

Comparaison des effets de tâches cognitives sur le mode du contrôle postural chez les jeunes adultes et les personnes âgées.

Alexandra Potvin-Desrochers

Thèse soumise à la
Faculté des études supérieures et postdoctorales
dans le cadre des exigences du programme de
de la Maîtrise ès sciences en Sciences de l'activité physique

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

Résumé

L'objectif de cette thèse était de comparer les effets de tâches cognitives sur le contrôle postural chez les jeunes adultes et les personnes âgées afin de confirmer le mode du contrôle postural privilégié dans un paradigme de double-tâche, et ce, en utilisant la Sample Entropie (SampEn). Vingt jeunes adultes et vingt-cinq personnes âgées devaient rester debout sur une plateforme de force tout en performant une tâche cognitive. Il y avait quatre tâches cognitives, dont deux de type discret et deux de type continu. Les tâches cognitives discrètes consistaient en un temps de réaction simple et en un temps de réaction go/no-go. Les tâches cognitives continues étaient une série d'équations, ainsi que le compte de l'occurrence d'un chiffre dans une série de nombres. Les résultats démontrent une réduction de l'aire et de la variabilité des oscillations, ainsi qu'une augmentation de la SampEn pour les jeunes adultes et les personnes âgées lors de la performance des tâches cognitives. Ces résultats suggèrent que performer une tâche cognitive promouvoit l'automatisation du contrôle postural chez les jeunes adultes et les personnes âgées, comme démontré par une stabilité et complexité posturales accrues.

Mots-clés: Double-tâche, contrôle postural, personnes âgées, jeunes adultes, SampEn

Remerciements

J'aimerais en premier lieu remercier toutes les personnes qui, de proche ou de loin, ont contribué à la complétion de cette thèse. Tout d'abord, j'aimerais remercier mon superviseur, Dr Yves Lajoie. Ton support et ton enseignement m'ont permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine, ainsi que de développer les habiletés techniques essentielles au processus de recherche. Merci de m'avoir pris sous ton aile comme étudiante et de m'avoir donné l'opportunité d'apprendre de ton expertise.

J'aimerais également remercier mes collègues de laboratoire, et plus particulièrement, Natalie Richer. Grâce à ton précieux aide, j'ai su perfectionner mon écriture scientifique. Merci de t'être rendue disponible pour répondre à mes diverses questions, et ce, malgré ton horaire, que je sais plus que chargé.

Merci à Dr Nicole Paquet et à Dr Diane Ste-Marie d'avoir accepté d'être sur mon comité de thèse. Via vos commentaires et conseils, vous avez permis de perfectionner et renforcer mon travail de thèse.

Je remercie aussi tous les individus ayant participé à mon étude. Collègues, amis, étudiants et connaissances, merci d'avoir trouvé du temps dans vos vies occupées pour m'aider à accomplir ce projet.

Finalement, un énorme merci à ma famille, et particulièrement à mes parents qui ont porté un intérêt constant envers l'avancement de ma thèse. Un merci particulier à mon amoureux, Marc-André Therrien. Tes habiletés en programmation ont été essentielles à la bonne progression de ce projet. Merci à vous, ma famille. Je suis très reconnaissante de vos encouragements, de vos conseils, ainsi que de votre support inconditionnel, et ce, depuis le tout début.

Table des matières

Chapitre 1. Revue de la littérature	1
1.1 Contrôle postural	1
1.2 Paradigme de double-tâche	3
1.3 Demande attentionnelle du contrôle postural	4
1.3.1 Interrelation entre les processus posturaux et cognitifs	4
1.3.2 Vieillesse	5
1.4 Modes du contrôle postural	6
1.5 Contrôle postural et tâches cognitives	6
1.5.1 L'articulation des réponses aux tâches cognitives	8
1.5.2 Modalités sensorielles des tâches cognitives	9
1.5.3 Classification des tâches cognitives	10
1.5.4 Tâches cognitives discrètes versus continues	11
1.5.5 Difficulté des tâches cognitives	12
1.5.6 Mesures utilisées	12
1.5.7 Interprétation des mesures posturales	13
1.6 Entropie	15
1.6.1 Pertinence de l'entropie	15
1.6.2 « Sample Entropy »	16
1.6.3 Entropie du système locomoteur et postural	17
1.6.4 Entropie du système postural et vieillissement	18
1.6.5 Entropie du contrôle postural en paradigme de double-tâche	19
1.7 Modèles théoriques	24
Chapitre 2. Introduction	26
2.1 Introduction	26
2.2 Objectifs	29
2.3 Hypothèses	29
Chapitre 3. Manuscrit	31
Chapitre 4. Discussion	62
4.1 Stabilité posturale	63

4.1.1 Jeunes adultes	64
4.1.2 Personnes âgées	66
4.1.3 Jeunes adultes versus personnes âgées	67
4.2 Complexité posturale	69
4.2.1 Jeunes adultes versus personnes âgées	70
4.2.2 Mode du contrôle postural	71
4.2.3 Interprétation de la stabilité posturale accrue	74
4.3 Résumé des résultats	75
Chapitre 5. Conclusion	77
5.1 Contribution à la littérature	77
5.2 Études futures	77
5.3 Limitations	78
Références	79
Annexe I. Questionnaire de santé	91
Annexe II. Mini-mental state evaluation	92

Chapitre 1. Revue de la littérature

1.1 Contrôle postural

Afin d'assurer un bon positionnement du corps dans l'espace, le contrôle postural permet de stabiliser le centre de masse à l'aide de l'intégration des informations proprioceptives, vestibulaires et visuelles (Horak, 2006; Winter, 1995). La perturbation, le mauvais fonctionnement ou la perte de l'un ou plusieurs de ces types d'informations sensorielles peut influencer le contrôle postural et les oscillations du corps. Donker et ses collègues (2007) ont observé une diminution de la stabilité posturale lors d'une perte d'informations visuelles. De même, une tâche posturale effectuée sur un coussin de mousse semble augmenter la variabilité des oscillations dû à une perte d'information proprioceptive (Patel et al., 2008). Des patients atteints d'une déficience vestibulaire unilatérale semblent aussi osciller significativement plus que des personnes en santé (Lacour et al., 1997).

Les mouvements du corps en position debout sont modalisés comme un pendule inversé où le corps est en rotation autour des chevilles (Gage, Winter, Frank & Adkin, 2004; Geursen, Altena, Massen & Verduin, 1976; Winter, 1995; Winter, Patla, Prince, Ishac & Gielo-Perczak, 1998). Comme la différence entre le centre de pression et le centre de masse est proportionnelle à l'accélération horizontale du centre de masse (Geursen et al., 1976; Murray, Seireg & Scholl, 1967; Winter et al., 1998), si le centre de pression se retrouve derrière le centre de masse, alors ce dernier subit une accélération vers l'avant (Winter, 1995; Winter et al., 1998), et vice versa. Si le centre de pression est à la gauche du centre de masse, le centre de pression subit une accélération

vers la droite, et vice versa. Ces mouvements sont nommés oscillations posturales et assurent le maintien du centre de pression à l'intérieur de la base de support (Horak, 2006; Winter, 1995).

Il existe trois stratégies différentes pour contrôler son équilibre, soit la stratégie de la cheville, de la hanche et du pas (Massion, 1994; Winter, 1995). L'utilisation de celles-ci diffère selon l'intensité de la perturbation posturale. Par exemple, la stratégie de la cheville est responsable des oscillations posturales et est privilégiée lors des perturbations mineures (Winter, 1995). La stratégie de la hanche sera pour sa part priorisée lorsque le centre de masse est à la limite de la base de support ou lorsque celle-ci est restreinte (Horak & Nashner, 1986). Finalement, la stratégie du pas sera employée lors de perturbations majeures pouvant entraîner une chute (Rubenstein, 2006).

Il est bien connu que l'efficacité du contrôle postural peut être diminuée chez les personnes âgées (Borel & Alescio-Lautier, 2014; Huxhold, Li, Schmiedek & Lindenberger, 2006). En effet, le vieillissement normal des systèmes musculosquelettique et neuromusculaire amènerait des déficits d'équilibre postural (Massion, 1994). Plus précisément, une dégradation des systèmes vestibulaire, visuel et proprioceptif génère entre autre une diminution de la stabilité de la tête et du tronc, une perturbation dans la stabilisation du regard et une instabilité posturale accrue (Borel & Alescio-Lautier, 2014). Il semblerait également qu'il est davantage demandant au niveau attentionnel pour les personnes âgées d'utiliser efficacement les différentes stratégies posturales pour retrouver l'équilibre (Brown, Shumway-Cook, & Woollacott, 1999).

1.2 Paradigme de double-tâche

Le paradigme de double-tâche est utilisé pour étudier la performance de deux tâches réalisées simultanément et est souvent employé pour évaluer l'interaction entre le contrôle postural et la cognition (Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Trois fondements sous-tendent ce paradigme, soit : 1) l'humain a une capacité de traitement de l'information limitée ; 2) la performance d'une tâche quelconque requiert une partie de cette capacité et 3) si deux tâches performées simultanément sollicitent plus que la capacité totale, alors la performance de l'une ou des deux tâches sera diminuée (Kahneman, 1973; Lajoie, Teasdale, Bard & Fleury, 1996).

Le paradigme de double-tâche est aussi porté par deux cadres théoriques distincts provenant de la psychologie cognitive, soit la théorie du goulot et la théorie de la capacité limitée (Fraizer & Mitra, 2008). Tout d'abord, la théorie du goulot, ou « bottleneck », propose que la performance simultanée de deux tâches suive un processus sériel (Fraizer & Mitra, 2008; Kahneman, 1973). Si une interférence survient entre deux tâches requérant le même traitement, celles-ci seront exécutées en séquence (Pashler, 1994). Le système nerveux semble donc imposer un délai temporaire pour traiter l'une des deux tâches afin de favoriser le traitement de la tâche priorisée, réduisant ainsi la performance de la tâche non-priorisée (Fraizer & Mitra, 2008).

Selon la théorie de la capacité limitée, l'interférence observée dans un paradigme de double-tâche vient du partage d'un nombre limité de ressources (Fraizer & Mitra, 2008). Ainsi, si deux tâches nécessitent une demande attentionnelle supérieure aux ressources disponibles, la performance de l'une d'elles ou même des deux tâches est détériorée (Fraizer & Mitra, 2008; Kahneman, 1973). Alors que Kahneman (1973) suggère que l'altération de performance provient d'un seul groupe de ressources, d'autres suggèrent l'existence de plusieurs groupes de ressources

(Guttentag, 1989; Pashler, 1994). Ainsi, si deux tâches partagent les mêmes groupes de ressources, il y aura dégradation dans la performance de l'une ou dans les des deux tâches (Guttentag, 1989).

1.3 Demande attentionnelle du contrôle postural

Pendant longtemps, le contrôle postural a été étudié comme un processus automatique ne nécessitant qu'un minimum d'attention (Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Toutefois, plusieurs études ont depuis démontré que le maintien d'une posture debout peut être demandant au niveau attentionnel même chez les jeunes adultes (Andersson, Hagman, Talianzaded, Svedberg & Larsen, 2002; Kerr, Condon & McDonald, 1985; Lajoie, Teasdale, Bard & Fleury, 1993; Remaud et al., 2012; Woollacott & Shumway-Cook, 2002).

1.3.1 Interrelation entre les processus posturaux et cognitifs

Kerr et ses collègues (1985) ont été les premiers à démontrer que les processus posturaux et cognitifs sont interreliés. Dans leur étude, les participants ont performé trois conditions : 1) tâche cognitive en position assise ; 2) tâche posturale (position Romberg tandem) ; et 3) tâche posturale et tâche cognitive. Les participants étaient assignés à l'une des deux tâches cognitives, soit la tâche de mémorisation spatiale Brooks ou la tâche de mémorisation non spatiale Brooks. Les résultats ont démontré que le maintien de la tâche posturale a affecté seulement la performance de la tâche spatiale. Ils ont donc conclu que le traitement de la tâche spatiale semble avoir recours aux mêmes ressources et mécanismes neuronaux que la régulation de la posture.

Lajoie et ses collègues (1993) ont étudié la demande attentionnelle de tâches posturales de différents niveaux de difficulté. Les participants ont performé quatre tâches posturales (c.-à-d.

assis, debout avec large base de support, debout avec petite base de support et marche) tout en répondant à une tâche de temps de réaction (c.-à-d. répondre « top » aux stimuli auditifs). Les résultats ont démontré que les temps de réaction étaient plus longs plus la difficulté des tâches posturales augmentait. Ils ont conclu que maintenir une position debout ainsi que marcher demandent plus de ressources attentionnelles qu'être assis. De façon similaire, Remaud et ses collègues (2012) ont démontré qu'avec une absence de vision, être en position debout augmentait le temps de réaction en comparant avec une position assise, proposant qu'une tâche posturale simple semble demander un certain niveau d'attention, même chez les jeunes adultes. Toutefois, la présence de vision semblait compenser pour la demande attentionnelle accrue des tâches posturales difficiles.

Toutefois, il semblerait que le contrôle de la posture nécessite qu'un niveau minimal d'attention (Dault, Geurts, Mulder & Duysens, 2001), et ce, surtout lorsque la vision est présente (Remaud et al., 2012). Ceci proviendrait du fait que le maintien d'une posture debout est une tâche bien apprise. Une revue de littérature de Woollacott et Shumway-Cook (2002) abonde dans le même sens en précisant que le niveau d'attention porté à la posture serait minime jusqu'à ce que le système postural soit stressé ou que la posture soit compromise.

1.3.2 Vieillesse

Il semblerait que le contrôle postural des personnes âgées nécessite davantage de ressources attentionnelles que les jeunes adultes (Borel & Alescio-Lautier, 2014; Lacour, Bernard-Demanze & Dumitrescu, 2008; Lajoie et al., 1996; Woollacott & Shumway-Cook, 2002), et ce, probablement dû à une diminution des fonctions sensorimotrices (Borel & Alescio-Lautier, 2014). Il a également été proposé que la demande attentionnelle accrue portée au

contrôle postural et associée à l'âge viendrait d'une détérioration liée au vieillissement des aires corticales responsables du traitement sensorimoteur de la posture (Li & Lindenberger, 2002).

1.4 Modes du contrôle postural

Il a été démontré qu'un focus d'attention porté sur les effets des oscillations posturales (c.-à-d. focus externe), en comparant avec un focus porté sur les oscillations posturales (c.-à-d. focus interne), amène une plus grande stabilité posturale (Wulf, 2007), une meilleure performance à une tâche de temps de réaction, ainsi qu'une diminution de la demande attentionnelle associée à la posture (Wulf, McNevin & Shea, 2001). À partir de ses études, Wulf a développé l'Hypothèse des contraintes de l'action (Wulf, 2007). Celle-ci propose qu'un focus d'attention interne, contraindrait le système de contrôle postural en intervenant dans les processus qui régulent normalement la posture, résultant en un mode contrôlé et conscient de la posture (Wulf et al., 2001). À l'opposé, un focus externe d'attention promouvoirait un mode automatique de contrôle, car il y aurait moins d'interférences nuisant au contrôle de la posture (Wulf et al., 2001; Wulf, Mercer, McNevin, & Guadagnoli, 2004).

1.5 Contrôle postural et tâches cognitives

Le paradigme de double-tâche a été utilisé maintes fois pour tenter d'expliquer la relation entre les processus posturaux et cognitifs. Toutefois, la littérature n'est pas unanime quant aux effets de la performance d'une tâche cognitive sur le contrôle postural. Chez les jeunes adultes, bien que la majorité des études ait rapporté une amélioration de la stabilité posturale (Andersson et al., 2002; Dault, Yardley & Frank, 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet, Deviterne, Gauchard, Vançon & Perrin, 2007; Jehu, Desponts, Paquet & Lajoie, 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie, Richer, Jehu & Tran, 2015; Maylor, Allison & Wing, 2001; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia, Richer,

Dionne & Lajoie, 2015; Prado, Stoffregen & Duarte, 2007; Riley, Baker & Schmit, 2003; Riley, Baker, Schmit & Weaver, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins, Roerdink & Beek, 2011; Swan, Otani & Loubert, 2007; Swan, Otani, Loubert, Sheffert & Dunbar, 2004; Weeks, Forget, Mouchnino, Gravel & Bourbonnais, 2003), d'autres ne rapportent aucun changement (Remaud et al., 2012) ou même une détérioration de celle-ci (Dault et al., 2003; Maylor et al., 2001; Melzer, Benjuya & Kaplanski, 2001; Mitra & Fraizer, 2004; Pellecchia, 2003; Shumway-Cook, Woollacott, Kerns & Baldwin, 1997; Woollacott & Velde, 2008; Yardley, Gardner, Leadbetter & Lavie, 1999). Chez les personnes âgées, également peu de constance existe. Certains ont trouvé une détérioration de la stabilité posturale (Huxhold et al., 2006; Jamet, Deviterne, Gauchard, Vançon & Perrin, 2004; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Melzer et al., 2001; Shumway-Cook et al., 1997), alors que d'autres ont trouvé une amélioration de celle-ci (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004; Weeks et al., 2003). De plus, à même les études démontrant une amélioration de la stabilité posturale, l'explication de cet effet de stabilisation diffère. Certains soutiennent que l'automatisation du contrôle postural en est la raison (Donker et al., 2007; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Lajoie et al., 2015; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004), alors que d'autres croient que la stabilisation provient de l'adoption d'une stratégie de raidissement des chevilles (Dault et al., 2001, 2003; Melzer et al., 2001; Weeks et al., 2003).

Une telle discordance dans les effets d'une tâche cognitive semble provenir du type de tâches cognitives utilisées, de la difficulté de celles-ci, des mesures du contrôle postural et même de l'interprétation de celles-ci.

1.5.1 L'articulation des réponses aux tâches cognitives

Les études semblent démontrer que des tâches cognitives nécessitant une articulation nuisent à la stabilité posturale (Dault et al., 2003; Yardley et al., 1999). Les résultats obtenus par Yardley et ses collègues (1999) ont démontré une augmentation des oscillations posturales lorsque les participants performaient une tâche cognitive nécessitant le parler. Les auteurs ont pu conclure que la diminution de la stabilité posturale associée à la performance de tâches cognitives nécessitant l'articulation proviendrait davantage du parler que de la compétition des ressources attentionnelles (Yardley et al., 1999). Quant à eux, Dault et ses collègues (2003) ont proposé que la dégradation de la stabilité posturale résulterait de la nécessité de coordination entre la respiration et l'articulation.

Certaines études ont recours à des tâches cognitives requérant le parler (Cavanaugh, Mercer & Stergiou, 2007; Dault et al., 2001, 2003; Jamet et al., 2007; Maylor & Wing, 1996; Melzer et al., 2001; Moghadam et al., 2011; Pellecchia, 2003; Shumway-Cook et al., 1997), alors que d'autres utilisent des tâches cognitives où les participants sont silencieux (Andersson et al., 2002; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Mitra & Fraizer, 2004; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003). Il est également important de mentionner que des tâches de temps de réaction requérant seulement l'articulation du mot « TOP » à l'audition d'un stimulus ont été utilisées dans certaines études (Jehu et al, 2015; Lajoie et al., 2015; Remaud et al., 2012).

1.5.2 Modalités sensorielles des tâches cognitives

Les tâches cognitives utilisées en double-tâche diffèrent également quant à la modalité sensorielle qu'elles sollicitent, soit une modalité visuelle ou auditive. Alors que Riley et ses collègues (2005) ont conclu que l'interaction entre la cognition et le contrôle postural pourrait être sensible aux modalités de la tâche cognitive, sans toutefois stipuler l'influence précise des modalités, Jamet et ses collègues (2007) ont suggéré que l'amélioration de la stabilité posturale lors de la performance de la tâche cognitive auditive viendrait de l'orientation de l'attention vers les stimuli auditifs. Toutefois, l'étude de Woollacott et Vander Velde (2008) n'a décelé aucune différence quant aux effets de la modalité des tâches cognitives sur la stabilité posturale, alors que Polskaia et Lajoie (2016) ont trouvé une plus grande irrégularité du centre de pression en performant une tâche cognitive auditive en comparaison à une tâche cognitive visuelle. Bien que des études se soient penchées sur la question (Jamet et al., 2007; Polskaia & Lajoie, 2016; Riley et al., 2005; Woollacott & Velde, 2008), la littérature ne permet toujours pas d'identifier la modalité sensorielle promouvant la meilleure stabilité posturale.

Afin de déterminer le lien entre les processus posturaux et cognitifs, certaines études ont utilisé des tâches cognitives visuelles (Dault et al., 2001; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004; Maylor et al., 2001; Melzer et al., 2001; Mitra & Fraizer, 2004; Prado et al., 2007; Shumway-Cook et al., 1997), alors que d'autres ont eu recours à des tâches cognitives auditives (Jehu et al., 2015; Maylor et al., 2001; Pellecchia, 2003; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Remaud et al., 2012; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003).

1.5.3 Classification des tâches cognitives

Dans une méta-analyse, Al-Yahya et ses collègues (2011) ont catégorisé les tâches cognitives utilisées dans la majorité des études ayant recours à un paradigme de double-tâche, et ce, selon cinq catégories basées sur les processus cognitifs qu'elles sollicitent. Tout d'abord, les tâches cognitives qui consistent à mesurer l'intervalle de temps entre l'apparition d'un stimulus et d'une réponse associée sont considérées comme des tâches de temps de réaction et ont été utilisées à maintes reprises dans la littérature (Huxhold et al., 2006; Jehu et al., 2015; Lajoie et al., 2015; Remaud et al., 2012; Siu & Woollacott, 2007). Quant à elles, les tâches de discrimination et de prise de décision font références à celles nécessitant une réponse en lien avec un stimulus sur lequel est porté l'attention. La tâche Stroop, utilisée dans plusieurs études (Dault et al., 2001; Jamet et al., 2004, 2007; Melzer et al., 2001), en est le meilleur exemple. La troisième catégorie est celle des tâches de fluence verbale lesquelles nécessitent la production spontanée de mots selon des critères préétablis. Bien que moins répandues, celles-ci ont tout de même été employées dans certaines études (Andersson et al., 2002; Maylor & Wing, 1996; Pellecchia, 2003; Stins et al., 2011; Yardley et al., 1999).

Enfin, les deux dernières catégories représentent des tâches cognitives nécessitant la rétention d'information. Alors que les tâches de suivi cognitif consistent à retenir de l'information et à utiliser celle-ci à l'aide d'autres processus cognitifs, les tâches de mémoire de travail ne requièrent aucune transformation de l'information retenue. Bien qu'elles soient similaires, ces tâches ont été utilisées de façon distincte dans la littérature, soit les tâches de suivi cognitif (Dault et al., 2003; Lajoie et al., 2015; Weeks et al., 2003) et celles de mémoire de travail (Huxhold et al., 2006; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing,

1996; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Swan et al., 2007, 2004).

Considérant les différentes catégories de tâches cognitives existantes et les différents processus cognitifs qu'elles sollicitent, il est possible de croire que chaque tâche cognitive a un effet unique sur le contrôle postural. Ainsi, l'utilisation des tâches cognitives et l'interprétation de leurs effets sur le contrôle postural, sans porter garde à leur classification, peuvent expliquer en partie les résultats discordants observés dans la littérature.

1.5.4 Tâches cognitives discrètes versus continues

Lajoie et ses collègues (2015) ont démontré que la performance d'une tâche cognitive continue améliore davantage la stabilité posturale qu'une tâche cognitive discrète. Le protocole de leur étude était composé de cinq conditions, soit une condition contrôle (c.-à-d. la tâche posturale), deux conditions avec la performance de tâches cognitives discrètes (c.-à-d. un temps de réaction simple et un temps de réaction go/no-go) et deux conditions avec la performance de tâches cognitives continues (c.-à-d. une équation mathématique et le compte de l'occurrence d'un chiffre dans une série de nombres). Les résultats ont démontré une diminution de l'aire et de la variabilité des oscillations plus prononcée pour les tâches continues en comparant avec les tâches discrètes. Il a été conclu que les tâches cognitives permettant d'occuper l'attention de façon continue semblaient améliorer davantage la stabilité posturale car elles offriraient moins l'opportunité de consciemment contrôler la posture.

Les études ont utilisé de façon irrégulière les tâches cognitives continues (Dault et al., 2003; Jamet et al., 2004, 2007; Maylor et al., 2001; Moghadam et al., 201; Prado et al., 2007;

Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003) et discrètes (Dault et al., 2001; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004, 2007; Jehu et al., 2015; Melzer et al., 2001; Pellecchia, 2003; Remaud et al., 2012; Shumway-Cook et al., 1997).

1.5.5 Difficulté des tâches cognitives

Les résultats des études se penchant sur les effets de la difficulté des tâches cognitives sur la stabilité posturale ne sont pas unanimes. En effet, certaines suggèrent que l'intégration de la tâche cognitive devient plus difficile avec l'augmentation de la demande attentionnelle de celle-ci, résultant en une dégradation de la stabilité posturale (Pellecchia, 2003). D'autres concluent qu'une tâche cognitive, peu importe son niveau de difficulté, induit que des changements minimes lorsque la posture est bien apprise (Dault et al., 2001). Toutefois, la majorité des études semblent démontrer une stabilité posturale accrue lors de la performance de tâches cognitives difficiles (Huxhold et al., 2006; Riley et al., 2003; Swan et al., 2007).

1.5.6 Mesures utilisées

L'utilisation de différentes mesures pour quantifier la stabilité posturale complique la comparaison des résultats entre les études. Les mesures les plus répandues sont celles dérivées des forces de réaction verticales obtenues par une plateforme de force (Fraizer & Mitra, 2008). Ces mesures comprennent la vitesse (Prado et al., 2007; Remaud et al., 2012), l'écart-type (Polskaia & Lajoie, 2016; Riley et al., 2005; Stins et al., 2011), le déplacement (Jehu et al., 2015; Pellecchia, 2003), la longueur du trajet (Jehu et al., 2015; Pellecchia, 2003; Riley et al., 2005), la racine carré moyenne (c.-à-d. RMS) (Huxhold et al., 2006; Prado et al., 2007) et la fréquence (Dault et al., 2003; Polskaia & Lajoie, 2016; Stins et al., 2011) du centre de pression, ainsi que

l'aire d'oscillation (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Remaud et al., 2012) et l'aire de l'ellipse à confiance 95% (Huxhold et al., 2006; Jehu et al., 2015; Polskaia & Lajoie, 2016).

Toutefois, il n'existe pas de consensus quant aux mesures décrivant le mieux la stabilité posturale (Fraizer & Mitra, 2008) et les analyses traditionnelles ne semblent pas être en mesure de détecter les différences reliées à l'âge sous des conditions de double-tâche (Lacour et al., 2008). Ainsi, il est évident que les méthodes traditionnelles utilisées pour quantifier la stabilité posturale ont des limitations et d'autres outils mathématiques sont nécessaires pour mieux évaluer le contrôle postural (Lacour et al., 2008).

1.5.7 Interprétation des mesures posturales

Dans un contexte de paradigme de double-tâche, une détérioration du contrôle postural est souvent interprétée comme étant le résultat d'une stabilité posturale diminuée, représentée entre autre par une augmentation de l'écart-type du centre de pression (Polskaia et al., 2015), l'aire de l'ellipse à confiance 95% (Melzer et al., 2001), l'aire d'oscillation (Huxhold et al., 2006; Remaud et al., 2012), le trajet du centre de pression (Dault et al., 2003), la fréquence d'oscillation (Dault et al., 2003) et la vitesse du centre de pression (Melzer et al., 2001). Cette diminution de la stabilité posturale est habituellement expliquée par l'adoption d'un mode contrôlé et conscient de la posture (Wulf et al., 2001).

A l'opposé, une amélioration de la stabilité posturale, et donc un meilleur contrôle postural, est souvent identifiable par une diminution de l'aire de l'ellipse à confiance 95% (Lajoie et al., 2015), l'aire d'oscillation (Huxhold et al., 2006), l'écart-type du centre de pression (Riley et al., 2005) et la RMS du centre de pression (Prado et al., 2007). Toutefois, certaines

exceptions existent. Par exemple, les personnes atteintes de la maladie de Parkinson peuvent démontrer une aire d'oscillation inférieure ou égale à celle des individus en santé, mais ceci ne représente pas une stabilité posturale accrue, mais plutôt l'adoption de stratégies posturales différentes, tel un raidissement des muscles de la cheville (Marchese, Bove & Abbruzzese, 2003; Schieppati, Hugon, Grasso, Nardone & Galante, 1994). Dans un contexte de paradigme de double-tâche, les études démontrent peu de constance quant à l'interprétation d'une amélioration de la stabilité posturale. Deux interprétations sont récurrentes, soit la stratégie de raidissement des chevilles et l'automatisation du contrôle postural.

Plusieurs études stipulent que l'adoption d'une stratégie de raidissement des chevilles, initialement évoqué par Winter et ses collègues (1998) est à l'origine de l'augmentation de la stabilité posturale observée dans un paradigme de double-tâche (Dault et al., 2001, 2003; McNevin & Wulf, 2002; Melzer et al., 2001; Weeks et al., 2003). Selon celle-ci, la stabilité posturale est augmentée par la co-contraction des muscles agonistes et antagonistes des chevilles afin de permettre aux ressources attentionnelles d'être dirigées vers la tâche cognitive. Une diminution de la variabilité du centre de pression combinée à une augmentation de la fréquence des oscillations (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002) et de la vélocité du centre de pression (Roerdink et al., 2006) semble indiquer l'utilisation de la stratégie de raidissement. Finalement, Stins et ses collègues (2011), contrairement à McNevin & Wulf (2002), soutiennent que cette stratégie ne semble pas représenter un contrôle postural automatisé puisqu'elle n'est pas énergétiquement efficace.

D'autres études expliquent la diminution de la variabilité et de l'aire des oscillations posturales lors de la performance simultanée d'une tâche cognitive par une automatisation du

contrôle postural chez les personnes âgées et les jeunes adultes (Donker et al., 2007; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Lajoie et al., 2015; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004). En retirant les ressources attentionnelles de la tâche posturale, la tâche cognitive semble permettre aux processus automatiques régulant la posture de fonctionner sans contraintes (McNevin & Wulf, 2002; Wulf et al., 2001) favorisant un contrôle postural automatisé. Cette interprétation provient de l'Hypothèse des contraintes de l'action qui découle des multiples études effectuées par Wulf (voir Wulf, 2007 pour une revue) concernant les effets du focus d'attention sur la performance des tâches motrices, dont le maintien postural. Depuis, plusieurs auteurs ont appliqué cette hypothèse pour interpréter l'amélioration de la stabilité posturale lors de la performance d'une tâche cognitive. Il est toutefois important de faire la distinction entre un focus externe d'attention et la performance d'une tâche cognitive, puisque, bien que tous les deux semblent avoir la capacité de générer une automatisation du contrôle postural, ils sont en fait différents en terme d'allocation des ressources attentionnelles. En effet, la performance d'une tâche cognitive retire les ressources attentionnelles de la posture, alors qu'un focus externe garde ces ressources sur la posture, mais sur un différent aspect de celle-ci.

Ainsi, il semble nécessaire d'utiliser d'autres mesures pour clarifier l'interprétation de la stabilité posturale accrue observée lors de la performance d'une tâche cognitive.

1.6 Entropie

1.6.1 Pertinence de l'entropie

Comme plusieurs limitations existent dans les mesures traditionnelles quantifiant la stabilité posturale (Lacour et al., 2008), il semble nécessaire de considérer d'autres types de

mesures pour identifier et interpréter adéquatement les effets de la performance d'une tâche cognitive sur le contrôle postural. Ceci pourrait être réalisé avec des méthodes non linéaires, telle l'entropie. En effet, il a été démontré que l'entropie ne devrait pas être une mesure ignorée lors de l'étude des oscillations posturales (Cavanaugh et al., 2007; Harbourne & Stergiou, 2003; Newell & Molenaar, 2014) et qu'il s'agirait d'une mesure capable de détecter des changements du centre de pression qui ne sont pas perceptibles avec les méthodes traditionnelles (Cavanaugh et al., 2006; Cavanaugh et al., 2007; Cavanaugh, 2005; Harbourne & Stergiou, 2003; Vaillancourt & Newell, 2000). Selon Stergiou et Decker (2011), l'entropie permet de quantifier la structure des variations d'une séquence, alors que les méthodes linéaires traditionnelles quantifient seulement la magnitude des variations des séquences. Ainsi, l'entropie offre une plus grande variété d'informations en ajoutant une quantification temporelle des oscillations posturales.

1.6.2 « Sample Entropy »

Dans cette étude, la « Sample Entropy » (SampEn) sera utilisée, car c'est le type d'entropie le plus répandu dans la littérature du contrôle postural et puisqu'il s'agit d'une analyse adéquate pour décrire les effets posturaux du vieillissement (Ramdani, Seigle, Lagarde, Bouchara, & Bernard, 2009). La SampEn fût introduite par Richman et Moorman (2000) et est définie comme la probabilité que deux séquences similaires ayant le même nombre de données restent similaires lorsqu'une donnée est ajoutée (Richman & Moorman, 2000). Il semblerait qu'en comparant avec d'autres types d'entropie, la SampEn réduit les biais, démontre plus de fiabilité et est indépendante de la longueur de la prise de données (Richman & Moorman, 2000).

La SampEn est représentée par un nombre réel, sans unités, qui se situe entre 0 et 2 (Pincus, 1991). La valeur nulle représente une séquence où les données sont parfaitement

répétables et prédictibles, alors qu'une valeur de 2 signifie que les séquences sont répétées seulement par chance (Pincus, 1991). Ainsi, plus la valeur de SampEn est petite, plus les oscillations posturales sont régulières. Trois paramètres, m , r , et N permettent de calculer la SampEn. Tout d'abord, N constitue la longueur de la séquence à analyser, m , le nombre de données à comparer dans la séquence et r , le niveau de tolérance suggérant une concordance entre les séquences de données (Richman & Moorman, 2000). La formule suivante permet de définir la SampEn :

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

où, $A(r)$ et $B(r)$ représentent le nombre total de séquences concordantes selon la tolérance r , et ce, dans l'espace dimensionnel approprié (c.-à-d. m pour $B(r)$ et $m + 1$ pour $A(r)$) (Richman & Moorman, 2000).

1.6.3 Entropie du système locomoteur et postural

De façon générale, il est connu que des valeurs basses d'entropie sont produites par des systèmes avec peu de degrés de liberté: ce sont des systèmes contraints (Newell & Molenaar, 2014). Pincus et Goldberger (1994) affirment que si un nombre limité de connexions existent entre les composantes d'un système, les réponses générées sont davantage prédictibles. Ainsi, chaque composante du système, quoique peu nombreuses, aura un plus grand impact dans la réponse produite. À l'opposé, les réponses générées par des systèmes complexes proviennent des multiples interactions entre les différentes composantes (Pincus & Goldberger, 1994). Dans ce cas, plusieurs composantes contribuent à la réponse, mais chacune n'y a qu'une petite influence.

Ceci peut être transposé à la régulation de la posture. Dû aux multiples connexions entre ses composantes, un système de contrôle postural sain semble pouvoir s'adapter à diverses situations et influences externes (Stergiou & Decker, 2011). Stergiou et Decker (2011) ont déterminé que lors d'une tâche de maintien postural en position debout et sous des conditions sensorielles normales, les oscillations posturales fluctuent de façon aléatoire. Ceci est attendu, car un minimum de contraintes est présent. Ils ont conclu que ces résultats reflètent l'état du système postural à répondre rapidement à une perturbation alors qu'il est sous conditions dites normales.

Cavanaugh et ses collègues (2006) ont trouvé que chez des personnes ayant subi une commotion cérébrale, les valeurs d'entropie des oscillations posturales sont significativement plus basses immédiatement après l'incident. Il semblerait également qu'une perte d'informations sensorielles amène une diminution de la complexité des oscillations posturales (Manor et al., 2010). Par exemple, le maintien d'une posture debout tout en ayant les yeux fermés engendre des fluctuations d'oscillation plus régulières, mais semble aussi produire une diminution de la stabilité posturale (Donker et al., 2007). Ceci représenterait une capacité d'adaptation moindre du système du contrôle postural, ainsi qu'une augmentation de la vulnérabilité face à des stressseurs, tels cognitifs (Manor et al., 2010).

1.6.4 Entropie du système postural et vieillissement

Vaillancourt et Newell (2002) ont proposé que selon l'âge ou la présence de maladie, il peut y avoir une augmentation ou une diminution de la complexité des différents systèmes du corps humain. Plus précisément, une fonction en U inversé semble bien représenter la complexité du système postural selon le cours d'une vie (Newell & Molenaar, 2014). Alors qu'une augmentation de la complexité est observée durant le développement de l'enfant jusqu'à l'âge

adulte (Newell & Molenaar, 2014), une diminution de celle-ci apparaît avec le vieillissement (Lipsitz, 2004; Lipsitz & Goldberger, 1992; Newell & Molenaar, 2014). Ce phénomène pourrait être expliqué par l'Hypothèse de la perte de complexité (Lipsitz & Goldberger, 1992), soutenant que ce sont les changements structuraux et fonctionnels dans l'organisation des différents systèmes humains qui entraînent une diminution de la complexité (Lipsitz & Goldberger, 1992). Plusieurs études ont réussi à soutenir cette hypothèse que ce soit au niveau de défaillances cardiaques (Ho et al., 1997), d'accidents vasculaires cérébraux (Makikallio et al., 2004) ou d'infarctus du myocarde (Bigger et al., 1996). Cette hypothèse est également applicable au contrôle postural puisque la diminution de la complexité des oscillations posturales observée chez les personnes de 60 ans et plus serait due à une diminution des degrés de liberté impliqués dans le maintien postural (Newell & Molenaar, 2014). De plus, il semblerait que les oscillations posturales de personnes âgées en santé soient moins régulières que celles de personnes âgées avec historique de chutes (Costa et al., 2008). Ceci laisse croire que les personnes âgées à risque de chuter ont un système postural moins complexe que les personnes âgées en santé.

1.6.5 Entropie du contrôle postural en paradigme de double-tâche

Chez les jeunes adultes, la majorité des études démontrent une augmentation de l'entropie des oscillations posturales lors de la performance d'une tâche cognitive (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009), mais d'autres n'ont trouvé aucun changement (Polskaia & Lajoie, 2016) ou même une diminution de l'entropie (Riley et al., 2003).

Cavanaugh et ses collègues (2007) ont utilisé l'entropie afin d'évaluer l'effet de la performance d'une tâche cognitive sur le contrôle postural de jeunes adultes. Ceux-ci ont réalisé six conditions sensorielles différentes (c.-à-d. trois niveaux de vision et deux niveaux

d'information vestibulaire), avec ou sans la tâche cognitive (c.-à-d. dire à haute voix une série de nombres entendue avant l'essai). Les résultats ont démontré une augmentation de l'entropie en antéropostérieur durant les conditions de double-tâche. Les auteurs mentionnent qu'une augmentation de l'entropie combinée à une stabilité posturale accrue représenterait l'adoption d'un mode automatique du contrôle de la posture dû à un déplacement expérimental des ressources attentionnelles vers la tâche cognitive. À l'inverse, une régularité des oscillations accrue combinée à la diminution de la stabilité posturale indiquerait un mode de contrôle postural contrôlé et inefficace.

De leur côté, Stins et ses collègues (2009) ont étudié les oscillations posturales d'une population de danseurs et de non-danseurs préadolescents. Le protocole consistait à se tenir debout sur une plateforme de force les yeux ouverts ou fermés et avec ou sans la performance d'une tâche cognitive (c.-à-d. se remémorer le plus de mots parmi ceux d'une bande sonore). Les résultats ont démontré une augmentation de la SampEn lors de la performance de la tâche cognitive, mais une diminution de celle-ci lorsqu'ils avaient les yeux fermés. Les auteurs ont conclu que l'organisation de la posture chez les humains est dépendante des caractéristiques de chacun, ainsi que de facteurs attentionnels induits par des perturbations sensorielles et cognitives.

Donker et ses collègues (2007) ont étudié l'effet d'une tâche cognitive et d'une privation visuelle sur le contrôle postural en utilisant, entre autres, des mesures entropiques chez de jeunes adultes. Ceux-ci étaient debout sur une plateforme tout en ayant les yeux ouverts ou fermés et en performant, ou non, une tâche cognitive (c.-à-d. prononcer à l'envers des noms cités par l'expérimentateur). Les résultats ont démontré que lorsque les participants avaient les yeux ouverts, la performance d'une tâche cognitive n'avait aucun effet sur la SampEn. Alors que le

maintien postural les yeux fermés, sans tâche cognitive, a diminué la SampEn, l'ajout d'une tâche cognitive dans ces conditions a augmenté la SampEn. La déviation expérimentale de l'attention combinée à une privation visuelle semble donc solliciter un contrôle postural automatisé. Les auteurs ont conclu que la régularité des oscillations semble positivement liée à la quantité de ressources attentionnelles portée au contrôle postural et qu'un focus interne d'attention, soit lorsque les ressources attentionnelles portées sur la posture, peut être néfaste.

Polskaia et Lajoie (2016) ont étudié la variation de complexité et de la modalité sensorielle d'une tâche cognitive sur le contrôle postural chez de jeunes adultes, en utilisant entre autres la SampEn. Les résultats ont démontré que la difficulté de la tâche cognitive n'a pas influencé la SampEn, mais que les tâches cognitives auditives ont engendré des valeurs plus élevées de SampEn que celles visuelles. Comme leurs résultats de mesures davantage traditionnelles démontrent une automatisation du contrôle postural, les auteurs mentionnent qu'il semble avoir des limitations à utiliser la régularité du centre de pression pour représenter l'investissement attentionnel.

Riley et ses collègues (2005) ont étudié les oscillations posturales de jeunes adultes qui se tenaient debout sur une surface rigide ou sur un coussin de mousse, avec leurs yeux ouverts ou fermés et en performant ou non une tâche cognitive facile ou difficile. Les résultats ont démontré que l'entropie a diminué avec la performance d'une tâche cognitive. Plus précisément, les valeurs d'entropie étaient significativement plus basses lors de la tâche cognitive difficile en comparant avec aucune tâche cognitive. Bien que la majorité des études soutiennent qu'une diminution de l'entropie soit associée à une détérioration du contrôle postural (Cavanaugh et al., 2007; Donker

et al., 2007; Stins et al., 2009), les auteurs ont proposé qu'avec les résultats des autres mesures utilisées, la diminution d'entropie puisse représenter une amélioration du contrôle postural.

À notre connaissance, seulement trois études ont regardé l'effet d'une tâche cognitive sur le contrôle postural de personnes âgées en utilisant l'entropie. Tout d'abord, Roerdink et ses collègues (2006) ont étudié la structure dynamique des fluctuations du centre de pression chez des patients récupérant d'un AVC et chez des personnes âgées en santé, entre autres, lors de la performance d'une tâche cognitive. Les résultats ont démontré que pour tous les participants et en comparant avec un maintien postural les yeux ouverts, l'entropie a augmenté et la variabilité du centre de pression est restée constante lors de la performance de la tâche cognitive. Les auteurs ont donc mentionné que les résultats supportent la relation entre la régularité du centre de pression et la quantité de ressources attentionnelles portées au contrôle postural.

De leur côté, Kang et ses collègues (2009) ont regardé les fluctuations du centre de pression de personnes âgées en santé, préfrêles et frêles, alors qu'ils comptaient à l'envers par bond de trois, à partir de 500. Les résultats ont démontré que les valeurs d'entropie étaient plus grandes et que la fréquence des oscillations, ainsi que l'étendue du centre de pression étaient plus basses en simple tâche qu'en double-tâche. Aussi, l'entropie était significativement plus petite chez les personnes âgées préfrêles et frêles que ceux en santé. Les auteurs ont donc conclu que toutes distractions cognitives pourraient augmenter le risque de chutes chez des personnes âgées frêles lors du maintien de la posture debout (Kang et al., 2009).

Finalement, Manor et ses collègues (2010) ont étudié la capacité d'adaptation de la posture lors de la performance d'une tâche cognitive concurrente, ainsi que les effets d'une

privation visuelle, proprioceptive et combinée sur la complexité du contrôle chez des personnes âgées. La tâche cognitive consistait à compter à l'envers par bond de trois, à partir de 500. Les résultats ont démontré que l'ajout d'une tâche cognitive diminue la complexité des oscillations posturales et augmente l'aire d'oscillations ainsi que la vitesse du centre de pression. Ces résultats étaient davantage marqués plus la privation sensorielle était importante. Manor et ses collègues (2010) suggèrent donc qu'une diminution de la complexité des oscillations posturales semble indiquer un système du contrôle postural simple et une capacité d'adaptation moindre.

Ainsi, chez les jeunes adultes, la majorité des études a trouvé une augmentation de la complexité posturale lors de la performance d'une tâche cognitive, toutefois, sans trouver aucun changement au niveau de la stabilité posturale, permettant tout de même de montrer la déviation des ressources attentionnelles de la tâche posturale vers la tâche cognitive (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009). Chez les personnes âgées, seulement une étude a soutenue cette déviation des ressources attentionnelles (Roerdink et al., 2006), alors que les deux autres ont plutôt trouvé une dégradation de la stabilité et de la complexité posturale lors de la performance d'une tâche cognitive (Kang et al., 2009; Manor et al., 2010). Autant chez les jeunes adultes que chez les personnes âgées, les études semblent avoir négligé certains aspects des tâches cognitives, comme l'utilisation de tâches cognitives nécessitant l'articulation (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Riley et al., 2005; Roerdink et al., 2006), ou même, le manque de contrôle de l'engagement cognitif (Kang et al., 2009; Manor et al., 2010; Stins et al., 2009). Il semble donc nécessaire d'utiliser les mesures entropiques dans un cadre méthodologique plus rigoureux.

1.7 Modèles théoriques

Trois modèles tentent d'expliquer les modifications induites au contrôle postural dues à la performance d'une tâche cognitive (Huxhold et al., 2006; Lacour et al., 2008). Tout d'abord, le modèle de compétition explique qu'une compétition existerait entre les ressources attentionnelles allouées à la tâche cognitive et à la tâche posturale (Lacour et al., 2008). Cette division de l'attention amènerait une dégradation de la performance posturale et/ou cognitive (Remaud et al., 2012), et ce, surtout chez les personnes portant plus d'attention à leur posture, telle les personnes âgées (Jamet et al., 2007). Plusieurs études ayant démontré une dégradation de la stabilité posturale en double-tâche semblent supporter ce modèle (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Kang et al., 2009; Melzer et al., 2001; Remaud et al., 2012). Toutefois, celui-ci est incapable d'expliquer les améliorations posturales observées dans plusieurs autres études ayant exploité un paradigme de double-tâche chez les jeunes adultes (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Riley et al., 2003; Swan et al., 2004) et les personnes âgées (Prado et al., 2007; Swan et al., 2004; Weeks et al., 2003).

Le deuxième modèle démontre qu'une relation en forme de U pourrait exister entre les variables quantifiant la stabilité posturale et les demandes cognitives, selon laquelle la stabilité posturale peut s'améliorer ou se détériorer selon le niveau de demande cognitive générée par la tâche cognitive (Huxhold et al., 2006). Toutefois, ce modèle semble plus approprié pour expliquer les résultats chez les personnes âgées puisque plusieurs études effectuées chez les jeunes adultes ont abouti à des résultats le contredisant (Huxhold et al., 2006; Riley et al., 2003; Swan et al., 2007). Ainsi, le fait qu'une tâche cognitive soit bénéfique ou nuisible pour la stabilité posturale dépendrait davantage de la capacité attentionnelle de chacun (Huxhold et al., 2006).

Finalement, le modèle de priorisation d'une tâche propose qu'en situation où les ressources attentionnelles pourrait être divisée entre deux tâches, l'une d'elle sera priorisée (Lacour et al., 2008). Il semblerait que le contrôle postural serait priorisé au détriment de la performance cognitive, et ce, surtout si la posture est compromise ou s'il y a un risque de blessures (Huxhold et al., 2006; Lacour et al., 2008). Ce modèle concorde avec le principe de « la posture en premier » proposé par Shumway-Cook et ses collègues (1997), selon lequel il y aurait une hiérarchie dans l'allocation des ressources attentionnelles et dans laquelle le contrôle postural serait la priorité. Toutefois, les résultats de plusieurs études contredisent ce modèle (Andersson et al., 2002; Barra, Bray, Sahni, Golding & Gresty, 2006; Dault et al., 2001; Huxhold et al., 2006; Shumway-Cook et al., 1997; Swan et al., 2004) en démontrant une performance de la tâche cognitive constante ou améliorée lorsque performée en double-tâche. De plus, plusieurs études suggèrent que ce serait plutôt la tâche cognitive qui serait priorisée permettant ainsi une automatisation du contrôle postural (Donker et al., 2007; Huxhold et al., 2006; Jehu et al., 2015; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015).

Chapitre 2. Introduction

2.1 Introduction

Plusieurs études ont utilisé un paradigme de double-tâche afin d'évaluer l'interaction entre le contrôle postural et la cognition en combinant la performance d'une tâche posturale et d'une tâche cognitive. Chez les jeunes adultes, certaines études ont trouvé une détérioration de la stabilité posturale lors de la performance d'une tâche cognitive (Dault et al., 2003; Maylor et al., 2001; Melzer et al., 2001; Mitra & Fraizer, 2004; Pellecchia, 2003; Shumway-Cook et al., 1997; Woollacott & Velde, 2008; Yardley et al., 1999), alors qu'une autre n'a trouvé aucun changement dans la stabilité posturale (Remaud et al., 2012). Toutefois, la majorité de la littérature semble rapporter une amélioration de la stabilité posturale (Andersson et al., 2002; Dault et al., 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003).

Des études similaires conduites chez les personnes âgées sont également divisées quant aux effets d'une tâche cognitive sur le contrôle postural. Certains ont trouvé une détérioration de la posture (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004, 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Melzer et al., 2001; Shumway-Cook et al., 1997), alors que d'autres ont trouvé une amélioration de celle-ci (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004; Weeks et al., 2003)

De façon générale, l'amélioration de la stabilité posturale observée dans un paradigme de

double-tâche a été interprétée de deux façons. Tout d'abord, certains auteurs interprètent cette stabilité posturale accrue par l'adoption d'une stratégie de raidissement des chevilles (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002) identifiable par une diminution des mesures spatiales du centre de pression, ainsi que par une augmentation de la fréquence d'oscillation (Dault, 2003; McNevin, 2002) et de la vélocité des oscillations posturales (Roerdink et al., 2006). D'autres suggèrent que le déplacement des ressources attentionnelles vers la tâche cognitive permet l'automatisation du contrôle postural améliorant ainsi la stabilité posturale (McNevin, Shea & Wulf, 2003; Polskaia & Lajoie, 2016; Swan et al., 2004; Wulf et al., 2001).

Plusieurs facteurs semblent pouvoir expliquer une telle discordance dans les résultats des études comme le type de tâches cognitives utilisé (Dault et al., 2003; Polskaia et al., 2015; Riley et al., 2005), la difficulté de celles-ci (Dault et al., 2001; Huxhold et al., 2006; Pellecchia, 2003), les mesures du contrôle postural utilisées (Fraizer & Mitra, 2008) et même l'interprétation de celles-ci (Dault et al., 2003; Swan et al., 2004). Ainsi, l'utilisation de mesures non linéaires, telle l'entropie, pourrait être bénéfique pour bien saisir les effets de la performance de tâches cognitives sur le contrôle postural. C'est pourquoi la SampEn sera ici utilisée afin de quantifier la structure temporelle du centre de pression et donc déterminer la complexité des oscillations posturales (Richman & Moorman, 2000). Sous des conditions sensorielles normales, les oscillations d'un système postural sain fluctuent de façon aléatoire (Stergiou & Decker, 2011) et les oscillations posturales des personnes âgées sont plus régulières et moins complexes que celles des jeunes adultes (Newell & Molenaar, 2014).

Peu d'études ont regardé les effets de tâches cognitives sur le contrôle postural en utilisant l'entropie chez les jeunes adultes. Curieusement, certaines études ont trouvé une diminution

(Riley et al., 2003) ou encore aucun changement (Polskaia & Lajoie, 2016) au niveau de l'entropie lors de la performance d'une tâche cognitive. Toutefois, la majorité des études semblent démontrer une augmentation des valeurs d'entropie (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009) suggérant qu'une corrélation positive existe entre la quantité d'attention portée au contrôle postural et la régularité des oscillations (Donker et al., 2007). De plus, il semble qu'une augmentation de la SampEn combinée à une diminution de la stabilité posturale représente l'adoption d'un mode automatique du contrôle de la posture dû à un détournement expérimental de l'attention vers la tâche cognitive (Donker et al., 2007). À l'inverse, une diminution de la régularité des oscillations combinée à une augmentation de la stabilité posturale indiquerait un mode de contrôle postural contrôlé et inefficace (Cavanaugh et al., 2007).

De telles études effectuées chez les personnes âgées sont encore moins nombreuses. Kang et ses collègues (2009) ont trouvé une plus grande régularité des oscillations posturales lorsque des personnes âgées en santé, préfrêles et frêles performaient une tâche cognitive en comparant avec la condition contrôle. Manor et ses collègues (2010) ont également trouvé une régularité accrue des oscillations posturales, ainsi qu'une diminution de l'aire des oscillations lors de la performance d'une tâche cognitive, suggérant une capacité d'adaptation moindre du système de contrôle postural.

Ainsi, plus d'études sont nécessaires afin de mieux comprendre l'interaction entre la performance d'une tâche cognitive et le contrôle postural chez de jeunes adultes et chez des personnes âgées.

2.2 Objectifs

L'objectif de cette thèse était principalement de comparer les effets de tâches cognitives sur le contrôle postural chez des jeunes adultes et des personnes âgées afin de confirmer le mode de contrôle postural privilégié dans un contexte de paradigme de double-tâche, et ce, en utilisant la SampEn. Un objectif supplémentaire était de répliquer deux conclusions présentes dans la littérature : [1] l'amélioration dans la stabilité posturale généralement observée chez les jeunes adultes lors de la performance d'une tâche cognitive est également présente chez les personnes âgées et [2] la performance d'une tâche cognitive continue favorise une meilleure stabilité posturale qu'une tâche cognitive discrète.

2.3 Hypothèses

1. Les jeunes adultes démontreraient une plus grande stabilité posturale que les personnes âgées pour toutes les conditions (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Swan et al., 2004).
2. La stabilité posturale des jeunes adultes et des personnes âgées augmenterait lors de la performance d'une tâche cognitive dû à un transfert de l'attention vers la tâche cognitive, comme démontré dans plusieurs études (Andersson et al., 2002; Dault et al., 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003).
3. Les valeurs de SampEn seraient significativement plus élevées lors de la performance de tâches cognitives chez les jeunes adultes (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009) et les personnes âgées, prouvant ainsi l'automatisation du contrôle

postural. Cette hypothèse, chez les personnes âgées, est basée sur les résultats d'une étude (Roerdink et al., 2006), ainsi que sur le fait qu'une amélioration posturale est attendue lors de la performance de tâches cognitives, suggérant donc une automatisation du contrôle postural. En se basant sur les études faites chez les jeunes adultes (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009), les valeurs de SampEn représentant cette automatisation sont élevées.

4. Les tâches cognitives continues promouvraient une plus grande stabilité posturale que les tâches cognitives discrètes, comme démontré par les résultats de Polskaia et ses collègues (2015). En effet, les tâches occupant l'attention de façon continue semblent offrir moins d'opportunité pour consciemment contrôler la posture (Polskaia et al., 2015).

Chapitre 3. Manuscrit

Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults

Gait and Posture

En révision

Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults

Alexandra Potvin-Desrochers¹, Natalie Richer¹, Yves Lajoie¹

¹: École des sciences de l'activité physique, Faculté des sciences de la santé, Université d'Ottawa

Abstract

Researchers looking at the effects of performing a concurrent cognitive task on postural control in young and older adults using traditional center-of-pressure measures and complexity measures found discordant results. Results of experiments showing improvements of stability have suggested the use of strategies such as automatization of postural control or stiffening strategy. This experiment aimed to confirm in healthy young and older adults that performing a cognitive task while standing leads to improvements that are due to automaticity of sway by using sample entropy. Twenty-one young adults and twenty-five older adults were asked to stand on a force platform while performing a cognitive task. There were four cognitive tasks: simple reaction time, go/no-go reaction time, equation and occurrence of a digit in a number sequence. Results demonstrated decreased sway area and variability as well as increased sample entropy for both groups when performing a cognitive task. Results suggest that performing a concurrent cognitive task promotes the adoption of an automatic postural control in young and older adults as evidenced by an increased postural stability and postural sway complexity.

Keywords: Dual-task, postural control, older adults, young adults, Sample Entropy

1. Introduction

Researchers have exploited the dual-task paradigm to evaluate the interaction between postural control and cognition. In young adults, performing a cognitive task has led to increases in traditional postural sway outcomes, such as sway variability, area, velocity and frequency, and thus to a deterioration in postural stability (Melzer et al., 2001; Pellecchia, 2003; M. Woollacott & Velde, 2008). This is possibly due to interference between attentional demands of both tasks (M. Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Alternatively, other researchers have demonstrated improved postural stability in cognitive task conditions (Nadia Polskaia et al., 2015; Riley et al., 2005; John F. Stins et al., 2011), hypothetically due to the use of more automatic postural control (Nadia Polskaia et al., 2015). By removing attention from the postural task, the cognitive task would allow automatic processes regulating posture to run unconstrained (McNevin et al., 2003; Wulf et al., 2001). Similarly, some researchers that have conducted experiments in the elderly found deteriorations in postural stability while performing a cognitive task (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004, 2007; M. Woollacott & Shumway-Cook, 2002), while others found improvements (Huxhold et al., 2006; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004).

These discordant results may be caused by various factors. For example, inconsistent results could come from the use of traditional COP measures that quantify sway variations, such as area, frequency and variability of COP (Mitra & Fraizer, 2004). Different measures of sway based on complexity may be more adequate to elucidate the effect of cognitive tasks on postural control (J.F. Stins et al., 2009). Sample entropy (SampEn) (Richman & Moorman, 2000) is used to determine the regularity of postural sway and quantifies the temporal structure of the COP by calculating the probability that two similar sequences with the same amount of data points remained similar when another data point is added. Values are comprised between 0 (perfectly regular sway) and 2 (totally irregular and unpredictable sway). Under normal sensory conditions,

the sway of a healthy postural system randomly fluctuates (Stergiou & Decker, 2011) and the sway of older adults is more regular than young adults (Newell & Molenaar, 2014).

Changes in sway could also be due to the use of a stiffening strategy (Melzer et al., 2001). Decreased COP variability combined with increased sway frequency (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002) and velocity (Roerdink et al., 2006) have been associated with a co-contraction of muscles about the ankle joint in order to increase postural stability and allow attention to be placed on the cognitive task. However, recent investigations examining muscle activity around the ankle joint revealed no stiffening in similar dual-task conditions (Richer, Saunders, Polskaia, & Lajoie, 2017).

Furthermore, changes could be due to the automatization of sway (Huxhold et al., 2006). Two modes of postural control have been identified: A controlled and ineffective mode and an automatic mode [10]. Increased entropy combined with increased postural stability is representative of an automatized postural control, caused by experimentally withdrawing attention from the postural task (Donker et al., 2007). Conversely, increased sway regularity combined with decreased postural stability would indicate a controlled and ineffective postural control (Donker et al., 2007). In young adults, performing a cognitive task while standing without vision led to decreased COP regularity (Donker et al., 2007). In older adults, performing a cognitive task while standing led to increased COP regularity and decreased sway area (Kang et al., 2009), suggesting a reduced adaptive capacity from the postural control system (Manor et al., 2010).

Finally, cognitive tasks that continuously engage attention have been found to yield improved postural stability in young adults as opposed to discrete tasks that only require intermittent engagement [27]. Continuous tasks may offer less opportunity to consciously control posture, thereby facilitating a more automatic postural control [27].

Results of several experiments have supported the idea that improvements in postural control during cognitive tasks are due to automaticity of sway, however the use of a complexity measure would reinforce these findings, particularly in older adults. Therefore, the purpose of this experiment was to confirm in young and older adults that performing a cognitive task while standing leads to improvements that are due to automaticity of sway by using SampEn. It was hypothesized that 1) young adults would be more stable than older adults; 2) postural stability would increase during performance of a cognitive task for both groups (Nadia Polskaia et al., 2015; Riley et al., 2005; John F. Stins et al., 2011); and 3) SampEn would be significantly higher while performing cognitive tasks for both groups (Donker et al., 2007).

2. Methods

2.1 Participants

Since the experimental protocol was identical to previous experiments (Yves Lajoie, Jehu, Richer, & Chan, n.d.; Yves Lajoie et al., 2015), data from participants assessed in those experiments was included. Sixteen young adults were taken from (Yves Lajoie et al., 2015) and twenty older adults were taken from (Yves Lajoie et al., n.d.). A supplementary five young and five older adults were recruited for a total sample of twenty-one young adults (6 males; 22.5 ± 2.0 years) and twenty-five older adults (5 males; 69.4 ± 3.4 years). This approach was chosen to analyse a larger sample size. Participants signed an informed consent form approved by the Research Ethics Board at the University of Ottawa in accordance with the ethical standards of the Declaration of Helsinki and had no self-reported physical or mental health issues that would influence their balance.

2.2 Apparatus

An AMTI force platform (ORG-6-1000, Watertown, MA, USA) measured COP by collecting the body's projection of ground reaction forces at a sampling frequency of 500 Hz. A

digital media player and two speakers placed on either side of participants were used to present the cognitive tasks. A Sony MP3 IC Recorder (ICD-UX70, San Diego, CA, USA) was used to record the auditory signal and verbal response at a sampling frequency of 44.1kHz.

2.3 Procedure

The experimental protocol consisted of a control standing condition and four dual-task conditions (two discrete and two continuous). For the control condition, participants stood quietly on the force platform with feet together, arms by their sides and eyes fixating an eye-level target three metres ahead. To maintain consistent foot placement, foot position was marked on the platform. Prior to experimental conditions, one familiarization trial was performed for each condition. For dual-task conditions, participants were asked to follow the instructions of the control condition while performing an auditory cognitive task. Discrete cognitive tasks consisted of a simple reaction time (SRT) and a go/no-go reaction time (GO/NG) task. For SRT, participants were asked to verbally answer “top” as fast as possible when they heard high-pitched auditory stimuli. Between seven and ten stimuli were randomly presented per trial. For GO/NG, participants were presented with high-pitched and low-pitched stimuli. They were asked to verbally answer “top” as fast as possible only when they heard high-pitched stimuli. Eleven or twelve stimuli were administered per trial, with five to seven of them being high-pitched. For the two RT conditions, participants were allowed a maximum of one error per trial otherwise the trial was redone. The continuous cognitive tasks were the equation (EQ) and the number sequence (NS) tasks. Those tasks were continuous in the sense that they were performed for the full duration of the trial with no delays. For EQ, participants mentally resolved a series of 20 simple mathematical operations presented every three seconds (e.g. $8-4*3+3$, etc.). Eight different equation sequences were randomly used. For NS, participants mentally counted the occurrence of a pre-selected digit in an auditory sequence composed of twenty three-digit numbers presented

every three seconds (e.g. count the number of 3s in the following sequence: 475, 353, 975, 403, etc.). Six different sequences were randomly administered and different target digits were requested at every trial in order to reduce possibility of memorization. For the continuous cognitive tasks, participants were asked not to use their fingers to count and to give their answer at the end of the trial. Participants were asked to continue the trial in the best of their ability if they lost count by using the last number they remembered, to ensure cognitive involvement for the entire duration of the trial. To verify if participants followed these instructions, they were asked after each trial if they lost track of their answer and, if so, if they guessed the answer. If participants reported guessing the answer, the trial was repeated, unbeknownst to participants. Participants performed eight 60-second trials per condition, presented in a randomized order and counterbalanced across participants. Participants were allowed a 30-second break between each trial.

2.4 Data Analyses

Ground reaction forces were processed using MatLab software (MathWorks Inc, MA, USA) to obtain area of 95% confidence ellipse (AREA), standard deviation (SD) of COP in AP and ML directions, mean velocity of COP in AP and ML directions and SampEn in AP and ML directions. Prior to SampEn calculation, data was desampled to 100Hz. This was done to better compare with experiments that used a sample frequency of 100Hz [7,25]. Then, SampEn was determined using the method developed by Richman and Moorman (Richman & Moorman, 2000) with the following formula:

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

in which N represents the length of the data sequence and $A(r)$ and $B(r)$, the total number of concordant sequences according to tolerance r in the appropriate dimensional space (i.e. m for

$B(r)$ and $m+1$ for $A(r)$) (Richman & Moorman, 2000). Parameters values were $m=2$ (number of data points to compare) and $r=0.2*SD$ (level of tolerance) (Kang et al., 2009). A Fast Fourier Transform analysis was used to obtain the mean power frequency (MPF) in the AP and ML directions using BioProc3 software (D.G.E. Robertson, Ottawa, Canada). RTs were obtained using Audacity software (version 2.1.2; Audacity, general public license) and represent the interval between the first deflection of the trace of the auditory stimulus and the first deflection of the trace of the verbal response.

2.5 Statistical Analyses

For each outcome measure, separate repeated measures analyses of variance on condition (control, SRT, GO/NG, EQ and NS) and on group (young adults and older adults) were performed. When necessary, post-hoc analyses were conducted using Fisher's least significant difference. Statistical significance was set as $p<.05$.

3. Results

Average values for outcome measures are presented in Tables 1 and 2. Non-significant differences were not presented. When both SRT and GO/NG or both EQ and NS had the same effect, we grouped them under the terms discrete cognitive tasks and continuous cognitive tasks, respectively.

3.1 Area of 95% confidence ellipse

AREA was smaller in young adults than older adults ($F_{1,44}=13.45$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.101$; Table 1). A main effect of condition was found ($F_{4,176}=4.93$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.280$; Table 1). The four cognitive tasks produced smaller AREA than control ($p<.05$). Continuous tasks produced smaller AREA than discrete tasks ($p<.05$). There was an interaction between group and condition ($F_{4,176}=2.33$, $p=.05$, $\eta_p^2=0.053$; Table 1). While AREA decreased for older adults from control to GO/NG and then stabilized for EQ and NS, AREA was stable for young adults from control to

GO/NG and then decreased for EQ and NS.

3.2 SD of COP

SD of COP in the ML direction was lower in young adults than older adults ($F_{1,44}=4.13$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.086$; Table 1). There was a main effect of condition ($F_{4,176}=14.73$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.251$; Table 1). GO/NG, EQ and NS tasks produced lower variability than control ($p<.001$). Also, EQ and NS produced lower variability than SRT and GO/NG ($p<.05$).

In the AP direction, a trend toward smaller sway variability in young adults as opposed to older adults was found ($F_{1,44}=3.05$, $p=.09$, $\eta_p^2=0.065$; Table 1). A main effect of condition was found ($F_{4,176}=12.88$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.226$; Table 1). The four cognitive tasks produced lower variability than control ($p<.01$). Continuous tasks produced smaller variability than discrete tasks ($p<.05$). There was an interaction between group and condition ($F_{4,176}=3.15$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.072$; Table 1). As variability decreased for older adults from control to GO/NG and then stabilized for EQ and NS, variability decreased for young adults from control to SRT, stabilized through GO/NG, and finally decreased for EQ and NS.

3.3 Mean Velocity of COP

No main effect of group on mean velocity in the ML and AP direction was found ($F_{1,44}=1.23$, $p>.05$ and $F_{1,44}=1.19$, $p>.05$, respectively; Table 1). There was a main effect of condition in both directions (ML: $F_{4,176}=26.35$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.375$; AP: $F_{4,176}=39.13$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.471$; Table 1). For ML and AP directions, there was no difference between control, SRT and GO/NG ($p>.05$) but those conditions had lower mean velocity than EQ and NS ($p<.01$). Also, mean velocity was higher in NS than EQ ($p<.001$). There was an interaction between group and condition (ML: $F_{4,176}=16.83$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.383$; AP: $F_{4,176}=21.05$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.478$; Table 1). As mean velocity stayed stable for older adults from control to GO/NG and then increased for EQ and NS, mean velocity was stable for young adults throughout all conditions.

3.4 MPF

MPF in the ML and AP directions was lower in young adults than older adults ($F_{1,44}=9.40$, $p<.01$, $\eta_p^2=0.176$ and $F_{1,44}=11.64$, $p<.01$, $\eta_p^2=0.209$, respectively; Table 1). There was a main effect of condition for both directions (ML: $F_{4,176}=2.82$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.060$; AP: $F_{4,176}=5.66$, $p<.001$, $\eta_p^2=0.114$; Table 1). In the ML direction, GO/NG and EQ produced higher MPF than control ($p<.05$) and EQ produced higher MPF than SRT ($p<.05$). In the AP direction, EQ and NS produced higher MPF than control ($p<.01$) and GO/NG ($p<.01$). EQ produced higher MPF than SRT ($p<.05$).

3.5 SampEn

In the ML direction, no effect of group on SampEn was found ($F_{1,44}=0.15$, $p>.05$; Fig. 1). There was a main effect of condition ($F_{4,176}=16.40$, $p<.00001$, $\eta_p^2=0.373$; Fig. 1). There was no difference in SampEn between control and SRT ($p>.05$) or between EQ and NS ($p>.05$). SampEn was higher in GO/NG than control and SRT, and was higher in continuous tasks than all other conditions.

Young adults had higher SampEn in the AP direction than older adults ($F_{1,44}=1.26$, $p=.05$, $\eta_p^2=0.098$; Fig. 2). There was a main effect of condition ($F_{4,176}=18.28$, $p<.00001$, $\eta_p^2=0.446$; Fig. 1). SampEn in control was lower than all other conditions ($p<.05$), discrete tasks had higher SampEn than control ($p<.05$), and continuous tasks had higher SampEn than all other conditions ($p<.05$).

3.6 RT

Young adults had faster RTs than older adults ($F_{1,44}=5.47$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.111$; Table 2), and RTs were faster in SRT than GO/NG ($F_{1,44}=259.98$, $p<.00001$, $\eta_p^2=0.855$; Table 2). There was an interaction between group and condition ($F_{1,44}=8.16$, $p<.01$, $\eta_p^2=0.156$). Older adults presented a larger increase in RT between SRT and GO/NG compared to young adults.

4. Discussion

The aim of this experiment was to confirm in young and older adults that performing a cognitive task while standing leads to postural stability improvements due to automaticity of sway. Firstly, replicated findings are presented, followed by novel findings.

4.1 Replication of results

As hypothesized and in line with previous research (Prado et al., 2007), older adults were less stable than young adults as indicated by larger AREA and variability (Table 1). RT was faster in young than older adults, and in SRT compared to GO/NG (Table 2). As hypothesized, and in agreement with results of previous experiments (Nadia Polskaia et al., 2015; Riley et al., 2005; John F. Stins et al., 2011), performing a cognitive task increased postural stability of young adults. While mean velocity remained constant for all conditions, AREA and variability were significantly smaller in continuous tasks compared to control and discrete tasks (Table 1). This improvement may be due to the continuous cognitive load that has directed attention to the cognitive task rather than on posture, allowing automatic processes to operate (Yves Lajoie et al., 2015). Alternatively, discrete tasks generated only intermittent cognitive load and thus, may not be as efficient to divert attention from posture for young adults.

As hypothesized and in line with results from previous experiments (Huxhold et al., 2006; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004), improved postural stability was observed in older adults when performing a cognitive task. AREA and variability in the AP direction decreased from control to GO/NG and remained constant for EQ and NS (Table 1). Older adults may have reached a plateau of postural stability for continuous tasks, whereas young adults increased their postural stability.

4.2 Novel findings

As expected, SampEn was higher for young compared to older adults in the AP direction

(Figure 2), which demonstrates that young adults had more complex and irregular sway than older adults. This finding supports the loss of complexity hypothesis (L. a. Lipsitz & Goldberger, 1992), according to which changes in structural and functional organization of human systems related to aging lead to a decrease in complexity. Present results can transpose this hypothesis to the postural control system. In fact, lower SampEn observed in older adults could have been due to a degradation of sensorimotor and musculoskeletal systems (Massion, 1994) resulting in more regular sway and a less complex postural control system.

As hypothesized, results revealed higher SampEn in AP and ML directions when performing a cognitive task (Figures 1 and 2). In fact, discrete tasks produced lower sway regularity than control. Continuous tasks also produced lower regularity than control and discrete tasks, which supports the automatization of postural control while performing a cognitive task in young and older adults. Increases in SampEn resulted from a shift of attention towards the cognitive task allowing automatic processes regulating posture to work unconstrained (Donker et al., 2007). In young adults, the increase in SampEn observed between control and discrete tasks and also between discrete and continuous tasks represents an even more pronounced shift of attention, as the cognitive tasks require continuous cognitive involvement. Results demonstrated that older adults were able to allocate their attention to the cognitive tasks, allowing the adoption of a more automatic postural control, which contradicts results of previous experiments (Kang et al., 2009; Manor et al., 2010). As mentioned above, older adults seemed to have reached a postural stability plateau while performing continuous tasks. The observed decrease in sway regularity for those tasks, however, suggests that older adults used a more automatic postural control even when performing continuous cognitive tasks.

Finally, a reduction in sway variability combined with an increased sway frequency (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002; Melzer et al., 2001) and velocity (Roerdink et al.,

2006) has been associated with the use of a stiffening strategy (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002; Melzer et al., 2001). Results of the present experiment showed reductions in AREA and variability and increases in MPF and mean velocity for the continuous tasks compared to control and discrete tasks (Table 1), which could support stiffening. However, SampEn values increased in the continuous tasks demonstrating that sway was irregular and suggesting that improvements in postural control in cognitive task conditions were not the result of stiffening but rather due to automaticity. Results also suggest that traditional COP measures should not be solely used to interpret how posture is controlled.

5. Conclusion

Results suggest that performing cognitive tasks while standing promoted the automatization of postural control in young and older adults as evidenced by increased postural stability and sway complexity. While adopting an automatic postural control, postural stability of older adults seemed to reach a plateau for continuous cognitive tasks, whereas young adults further increased their postural stability. Finally, results suggest that complexity measures of sway and traditional COP measures should both be considered to interpret how posture is controlled.

Conflict of interest statement

Authors have no conflict of interest to declare.

References

- Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *35*(3), 715–728. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>
- Andersson, G., Hagman, J., Talianzaded, R., Svedberg, A., & Larsen, H. C. (2002). Effect of cognitive load on postural control. *Brain Research Bulletin*, *58*(1), 135–139. [http://doi.org/10.1016/S0361-9230\(02\)00770-0](http://doi.org/10.1016/S0361-9230(02)00770-0)
- Barra, J., Bray, A., Sahni, V., Golding, J. F., & Gresty, M. A. (2006). Increasing cognitive load with increasing balance challenge : recipe for catastrophe. *Experimental Brain Research*, *174*, 734–745. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0519-2>
- Bigger, J. T., Steinman, R. C., Rolnitzky, L. M., Fleiss, J. L., Albrecht, P., & Cohen, R. J. (1996). Power Law Behavior of RR-Interval Variability in Healthy Middle-Aged Persons, Patients With Recent Acute Myocardial Infarction, and Patients With Heart Transplants. *Circulation*, *93*(12), 2142–2151. <http://doi.org/10.1161/01.CIR.93.12.2142>
- Borel, L., & Alescio-Lautier, B. (2014). Posture and cognition in the elderly: Interaction and contribution to the rehabilitation strategies. *Neurophysiologie Clinique*, *44*(1), 95–107. <http://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.129>
- Brown, L. a, Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (1999). Attentional demands and postural recovery: the effects of aging. *The Journals of Gerontology: MEDICAL SCIENCES*, *54A*(4), M165–M171. <http://doi.org/10.1093/gerona/54.4.M165>
- Cavanaugh, J. T. (2005). Detecting altered postural control after cerebral concussion in athletes with normal postural stability. *British Journal of Sports Medicine*, *39*(11), 805–811. <http://doi.org/10.1136/bjism.2004.015909>
- Cavanaugh, J. T., Guskiewicz, K. M., Giuliani, C., Marshall, S., Mercer, V. S., & Stergiou, N.

- (2006). Recovery of postural control after cerebral concussion: New insights using approximate entropy. *Journal of Athletic Training*, 41(3), 305–313. <http://doi.org/doi>: DOI: 10.1016/j.pmrj.2009.03.011
- Cavanaugh, J. T., Mercer, V. S., & Stergiou, N. (2007). Approximate entropy detects the effect of a secondary cognitive task on postural control in healthy young adults: a methodological report. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4(1), 42. <http://doi.org/10.1186/1743-0003-4-42>
- Costa, M., Priplata, A. A., Lipsitz, L. A., Wu, Z., Huang, N. E., Goldberger, A. L., & Peng, C.-K. (2008). Noise and poise: Enhancement of postural complexity in the elderly with a stochastic-resonance-based therapy. *Europhys Lett.*, 15(10), 1203–1214. <http://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2008.02.002.A>
- Craik, F. I. M., & Salthouse, T. A. (2008). *The handbook of aging and cognition. Psychology Press* (Vol. 23). <http://doi.org/10.1002/acp.1505>
- Dault, M. C., Geurts, A. C. H., Mulder, T. W., & Duysens, J. (2001). Postural control and cognitive task performance in healthy participants while balancing on different support-surface configurations. *Gait and Posture*, 14(3), 248–255. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00130-8](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00130-8)
- Dault, M. C., Yardley, L., & Frank, J. S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Cognitive Brain Research*, 16, 434–440.
- 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. <http://doi.org/10.1007/s00221-007-0905-4>
- Fraizer, E. V., & Mitra, S. (2008). Methodological and interpretive issues in posture-cognition dual-tasking in upright stance. *Gait and Posture*, 27(2), 271–279.

<http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.04.002>

Gage, W. H., Winter, D. A., Frank, J. S., & Adkin, A. L. (2004). Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing. *Gait & Posture*, *19*(2), 124–32.

[http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(03\)00037-7](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(03)00037-7)

Geursen, J.-B., Altena, D., Massen, C.-H., & Verduin, M. (1976). A model of the standing man for the description of his dynamic behaviour.pdf. *Symposium International de Posturographie*.

Guttentag, R. E. (1989). Age differences in dual-task performance: Procedures, assumptions, and results. *Developmental Review*, *9*(2), 146–170. [http://doi.org/10.1016/0273-2297\(89\)90027-0](http://doi.org/10.1016/0273-2297(89)90027-0)

Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Developmental Psychobiology*, *42*(4), 368–377.

<http://doi.org/10.1002/dev.10110>

Ho, K. K. L., Moody, G. B., Peng, C.-K., Mietus, J. E., Larson, M. G., Levy, D., & Goldberger, A. L. (1997). Predicting Survival in Heart Failure Case and Control Subjects by Use of Fully Automated Methods for Deriving Nonlinear and Conventional Indices of Heart Rate Dynamics. *Circulation*, *96*(3), 842–848. <http://doi.org/10.1161/01.CIR.96.3.842>

Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, *35*(Supplement 2), ii7-ii11.

<http://doi.org/10.1093/ageing/afl077>

Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, *55*(6), 1369–1381.

<http://doi.org/3734861>

Horak, F. B., Shupert, C. L., & Mirka, A. (1989). Components of Postural Dyscontrol in the

- Elderly : A Review. *Neurobiology of Aging*, 10, 727–738.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.01.002>
- Jamet, M., Deviterne, D., Gauchard, G. C., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2004). Higher visual dependency increases balance control perturbation during cognitive task fulfilment in elderly people. *Neuroscience Letters*, 359, 61–64. <http://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.02.010>
- Jamet, M., Deviterne, D., Gauchard, G. C., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2007). Age-related part taken by attentional cognitive processes in standing postural control in a dual-task context. *Gait and Posture*, 25(2), 179–184. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.03.006>
- Jehu, D. A., Desponts, A., Paquet, N., & Lajoie, Y. (2015). Prioritizing attention on a reaction time task improves postural control and reaction time. *International Journal of Neuroscience*, 125(2), 100–106. <http://doi.org/10.3109/00207454.2014.907573>
- Jette, A. M., Branch, L. G., & Berlin, J. (1990). Musculoskeletal impairments and physical disablement among the aged. *Journal of Gerontology*, 45(6), M203–M208.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. *The American Journal of Psychology* (Vol. 88). <http://doi.org/10.2307/1421603>
- Kang, H. G., Costa, M. D., Priplata, A. A., Starobinets, O. V., Goldberger, A. L., Peng, C.-K., ... Lipsitz, L. A. (2009). Frailty and the Degradation of Complex Balance Dynamics During a Dual-Task Protocol. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 64(12), 1304–1311. <http://doi.org/10.1093/gerona/glp113>
- Kerr, B., Condon, S. M., & McDonald, L. A. (1985). Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and*

- Performance*, 11(5), 617–622. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.11.5.617>
- Lacour, M., Barthelemy, J., Borel, L., Magnan, J., Xerri, C., Chays, A., & Ouaknine, M. (1997). Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Experimental Brain Research*, 115, 300–310.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lajoie, Y., Jehu, D. A., Richer, N., & Chan, A. (n.d.). Continuous and difficult discrete cognitive tasks promote improved stability in older adults.
- Lajoie, Y., Richer, N., Jehu, D. A., & Tran, Y. (2015). Continuous Cognitive Tasks Improve Postural Control Compared to Discrete Cognitive Tasks to Discrete Cognitive Tasks. *Journal of Motor Behavior*, 0(0). <http://doi.org/10.1080/00222895.2015.1089833>
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1993). Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*, 97(1), 139–144. <http://doi.org/10.1007/BF00228824>
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1996). Upright Standing and Gait: Are There Changes in Attentional Requirements Related to Normal Aging? *Experimental Aging Research*, 22(2), 185–198. <http://doi.org/10.1080/03610739608254006>
- Laughton, C. A., Slavin, M., Katdare, K., Nolan, L., Bean, J. F., Kerrigan, D. C., ... Collins, J. J. (2003). Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. *Gait & Posture*, 18, 101–108. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00200-X](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00200-X)
- Li, K. Z. H., & Lindenberger, U. (2002). Relations between aging sensory / sensorimotor and cognitive functions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26, 777–783.

- Lipsitz, L. A. (2004). Physiological complexity, aging, and the path to frailty. *Science of Aging Knowledge Environment : SAGE KE*, 2004(16), pe16.
<http://doi.org/10.1126/sageke.2004.16.pe16>
- Lipsitz, L. a., & Goldberger, A. L. (1992). Loss of “Complexity” and Aging Potential Applications of Fractals and Chaos theory to Senescence. *The Journal of the American Medical Association*, 267(13), 1806–1809.
<http://doi.org/10.1001/jama.1992.03480130122036>
- Makikallio, A. M., Makikallio, T. H., Korpelainen, J. T., Sotaniemi, K. A., Huikuri, H. V., & Myllyla, V. V. (2004). Heart rate dynamics predict poststroke mortality. *Neurology*, 62(10), 1822–1826. <http://doi.org/10.1212/01.WNL.0000125190.10967.D5>
- Manor, B., Costa, M. D., Hu, K., Newton, E., Starobinets, O., Kang, H. G., ... Lipsitz, L. a. (2010). Physiological complexity and system adaptability: evidence from postural control dynamics of older adults. *Journal of Applied Physiology*, 109, 1786–1791.
<http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00390.2010>
- Marchese, R., Bove, M., & Abbruzzese, G. (2003). Effect of Cognitive and Motor Tasks on Postural Stability in Parkinson ’ s Disease : A Posturographic Study, 18(6), 652–658.
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 877–887.
[http://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](http://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6)
- Maylor, E. A., Allison, S., & Wing, A. M. (2001). Effects of spatial and nonspatial cognitive activity on postural stability. *British Journal of Psychology*, 92, 319–338.
<http://doi.org/10.1348/000712601162211>
- Maylor, E. A., & Wing, A. M. (1996). Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 51B(3), 143–154. <http://doi.org/10.1093/geronb/51B.3.P143>

- McNevin, N. H., Shea, C. H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research*, *67*, 22–29.
<http://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31823f275c>
- McNevin, N. H., & Wulf, G. (2002). Attentional focus on supra-postural tasks affects postural control. *Human Movement Science*, *21*, 187–202. [http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(02\)00095-7](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(02)00095-7)
- Melzer, I., Benjuya, N., & Kaplanski, J. (2001). Age-related changes of postural control : Effect of cognitive tasks. *Gerontology*, *47*, 189–194.
- Mitra, S., & Fraizer, E. V. (2004). Effects of explicit sway-minimization on postural – suprapostural dual-task performance. *Human Movement Science*, *23*, 1–20.
<http://doi.org/10.1016/j.humov.2004.03.003>
- Moghadam, M., Ashayeri, H., Salavati, M., Sarafzadeh, J., Taghipoor, K. D., Saeedi, A., & Salehi, R. (2011). Reliability of center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait & Posture*, *33*(4), 651–5. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.016>
- Murray, M. P., Seireg, A., & Scholl, R. C. (1967). Center of gravity, center of pressure, and supportives forces during human activities. *Journal of Applied Physiology*, *23*(6), 8–11.
- Newell, K. M., & Molenaar, P. C. M. (2014). *Applications of Nonlinear Dynamics To Developmental Process Modeling*. Retrieved from
<https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=WR4BAwAAQBAJ&pgis=1>
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*(2), 220–244. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.116.2.220>
- Patel, M., Fransson, P. A., Lush, D., Petersen, H., Magnusson, M., Johansson, R., ... Johansson, R. (2008). The effects of foam surface properties on standing body movement. *Acta Oto-*

- Laryngologica*, 128(9), 952–960. <http://doi.org/10.1080/00016480701827517>
- Pellecchia, G. L. (2003). Postural sway increases with attentional demands of concurrent cognitive task. *Gait & Posture*, 18, 29–34. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00138-8](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00138-8)
- Pincus, S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(6), 2297–2301. <http://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>
- Pincus, S. M., & Goldberger, A. L. (1994). Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? *The American Journal of Physiology*, 266(4 Pt 2), H1643–H1656.
- Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2016). Reducing postural sway by concurrently performing challenging cognitive tasks. *Human Movement Science*, 46, 177–183. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2015.12.013>
- Polskaia, N., Richer, N., Dionne, E., & Lajoie, Y. (2015). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention. *Gait & Posture*, 41, 454–458. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.11.009>
- Prado, J. M., Stoffregen, T. A., & Duarte, M. (2007). Postural Sway during Dual Tasks in Young and Elderly Adults. *Gerontology*, 53, 274–281. <http://doi.org/10.1159/000102938>
- Ramdani, S., Seigle, B., Lagarde, J., Bouchara, F., & Bernard, P. L. (2009). On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. *Medical Engineering & Physics*, 31(8), 1023–31. <http://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.06.004>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional Demands Associated With Postural Control Depend on Task Difficulty and Visual Condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5), 329–340. <http://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Richer, N., Saunders, D., Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). Gait & Posture The effects of attentional focus and cognitive tasks on postural sway may be the result of automaticity.

Gait & Posture, 54, 45–49. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.022>

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, H2039–H2049.

Riley, M. A., Baker, A. A., & Schmit, J. M. (2003). Inverse relation between postural variability and difficulty of a concurrent short-term memory task. *Brain Research Bulletin*, 62, 191–195. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2003.09.012>

Riley, M. A., Baker, A. A., Schmit, J. M., & Weaver, E. (2005). Effects of visual and auditory short-term memory tasks on the spatiotemporal dynamics and variability of postural sway. *Journal of Motor Behavior*, 37(4), 311–324. <http://doi.org/10.3200/JMBR.37.4.311-324>

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, 256–269. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0441-7>

Rubenstein, L. Z. (2006). Falls in older people : epidemiology, risk factors and strategies for prevention. *Age and Ageing*, 35(S2), 37–41. <http://doi.org/10.1093/ageing/afl084>

Schieppati, M., Hugon, M., Grasso, M., Nardone, A., & Galante, M. (1994). The limits of equilibrium in young and elderly normal subjects and in parkinsonians. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/ Evoked Potentials*, 93(4), 286–298. [http://doi.org/10.1016/0168-5597\(94\)90031-0](http://doi.org/10.1016/0168-5597(94)90031-0)

Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The Effects of Two Types of Cognitive Tasks on Postural Stability in Older Adults With and Without a History of Falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 52A(4), M232–M240. <http://doi.org/10.1093/gerona/52A.4.M232>

- Siu, K.-C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait & Posture*, *25*(1), 121–126.
<http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, *30*, 869–888.
<http://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.04.001>
- Stins, J. F., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2011). To freeze or not to freeze? Affective and cognitive perturbations have markedly different effects on postural control. *Human Movement Science*, *30*, 190–202. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.013>
- Swan, L., Otani, H., & Loubert, P. V. (2007). Reducing postural sway by manipulating the difficulty levels of a cognitive task and a balance task. *Gait and Posture*, *26*(3), 470–474.
<http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.11.201>
- Swan, L., Otani, H., Loubert, P. V., Sheffert, S. M., & Dunbar, G. L. (2004). Improving balance by performing a secondary cognitive task. *British Journal of Psychology*, *95*, 31–40.
<http://doi.org/10.1348/000712604322779442>
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2000). The dynamics of resting and postural tremor in Parkinson's disease. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 2046–2056.
[http://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00467-3](http://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00467-3)
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiol Aging*, *23*(1), 1–11.
[http://doi.org/10.1016/S0197-4580\(02\)00052-0](http://doi.org/10.1016/S0197-4580(02)00052-0)

- Weeks, D. L., Forget, R., Mouchnino, L., Gravel, D., & Bourbonnais, D. (2003). Interaction between attention demanding motor and cognitive tasks and static postural stability. *Gerontology, 49*, 225–232. <http://doi.org/10.1159/000070402>
- Whipple, R., Wolf, L., Derby, C., Singh, D., & Tobin, J. (1993). Altered Sensory Function and Balance in Older Persons. *The Journal of Gerontology, 48*(Special Issue), 71–76.
- Winter, D. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture, 3*(4), 193–214. [http://doi.org/10.1016/0966-6362\(96\)82849-9](http://doi.org/10.1016/0966-6362(96)82849-9)
- Winter, D. A., Patla, A. E., Prince, F., Ishac, M., & Gielo-Periczak, K. (1998). Stiffness Control of Balance in Quiet Standing. *Journal of Neurophysiology, 80*(3), 1211–1221. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(97\)83378-4](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(97)83378-4)
- Woollacott, M. H., & Shumway-Cook, A. (1990). Changes in posture control across the life span—a systems approach. *Physical Therapy, 70*(12), 799–807.
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & Posture, 16*, 1–14. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00156-4](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4)
- Woollacott, M., & Velde, T. J. Vander. (2008). Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain Research, 1208*, 95–102. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.03.005>
- Wulf, G. (2007). Attentional focus and motor learning: a review of 10 years of research. *E-Journal Bewegung Und Training, 1*, 1–64.
- Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 54A*(4), 1143–1154. <http://doi.org/10.1080/0272498014300011>
- Wulf, G., Mercer, J., McNevin, N., & Guadagnoli, M. A. (2004). Reciprocal Influences of

Attentional Focus on Postural and Suprapostural Task Performance. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 189–199. <http://doi.org/10.3200/JMBR.36.2.189-199>

Yardley, L., Gardner, M., Leadbetter, A., & Lavie, N. (1999). Effect of articulatory and mental tasks on postural control. *NeuroReport*, 10(2), 215–219. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1689046>

Figure captions

Table 1. Mean (SD) of each postural stability measure across all conditions for young adults and older adults

Table 2. Mean and SD of reaction time for the SRT and GO/NG tasks for young adults and older adults

Fig. 1. Mean + SD of SampEn in the ML direction for control, SRT, GO/NG, EQ, and NS for young adults and older adults (*p =.05, **p < .05, ***p < .001).

Fig. 2. Mean + SD of SampEn in the AP direction for control, SRT, GO/NG, EQ, and NS for young adults and older adults (*p =.05, **p < .05, ***p < .001).

Table 1.

Mean (SD) of each postural stability measure across all conditions for young adults and older adults

Outcome measures	Control		SRT		GO/NG		EQ		NS	
	Young adults	Older adults	Young adults	Older adults	Young adults	Older adults	Young adults	Older adults	Young adults	Older adults
Area (cm ²)	4.060 (1.719)	5.261 (1.933)	3.811 (1.591)	4.824 (2.001)	3.784 (1.744)	4.431 (1.885)	3.137 (1.396)	4.413 (1.915)	2.936 (1.281)	4.320 (1.737)
SD of COP in ML (cm)	0.445 (0.121)	0.522 (0.129)	0.434 (0.114)	0.506 (0.130)	0.424 (0.108)	0.486 (0.134)	0.398 (0.107)	0.478 (0.130)	0.386 (0.104)	0.479 (0.127)
SD of COP in AP (cm)	0.479 (0.148)	0.532 (0.092)	0.446 (0.132)	0.502 (0.104)	0.453 (0.157)	0.475 (0.100)	0.395 (0.114)	0.478 (0.110)	0.381 (0.119)	0.477 (0.097)
Velocity of COP in ML (cm.s ²)	2.494 (0.582)	2.619 (0.491)	2.476 (0.568)	2.649 (0.490)	2.498 (0.571)	2.638 (0.524)	2.520 (0.581)	2.786 (0.517)	2.548 (0.593)	3.013 (0.579)
Velocity of COP in AP (cm.s ²)	2.809 (0.631)	2.790 (0.493)	2.824 (0.628)	2.831 (0.478)	2.827 (0.630)	2.805 (0.478)	2.884 (0.638)	3.079 (0.582)	3.034 (0.678)	3.854 (0.993)
MPF in ML (Hz)	0.308 (0.105)	0.384 (0.115)	0.306 (0.128)	0.395(0.089)	0.317 (0.109)	0.415 (0.098)	0.336 (0.103)	0.413 (0.104)	0.314 (0.117)	0.416 (0.095)
MPF in AP (Hz)	0.281 (0.102)	0.328 (0.077)	0.279 (0.077)	0.357 (0.085)	0.258 (0.343)	0.343 (0.721)	0.305 (0.099)	0.386 (0.103)	0.296 (0.093)	0.373 (0.087)

Table 2

Mean and SD of reaction time for the SRT and GO/NG tasks for young adults and older adults

	Young adults		Older adults	
	SRT	GO/NG	SRT	GO/NG
RT (ms)	361.72	454.81	385.01	518.2
SD (ms)	51.52	62.5	69.92	77.94

Figure 1.

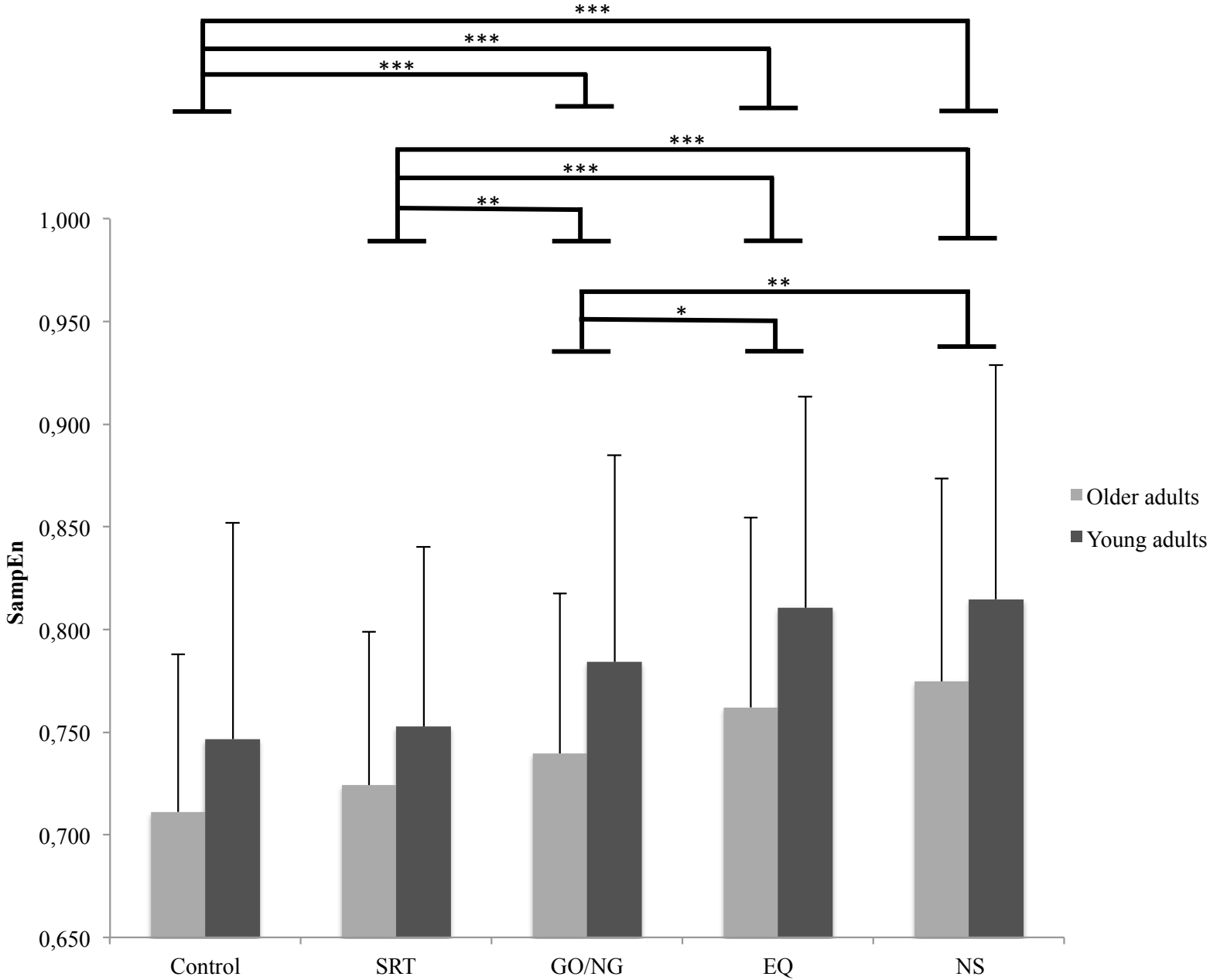
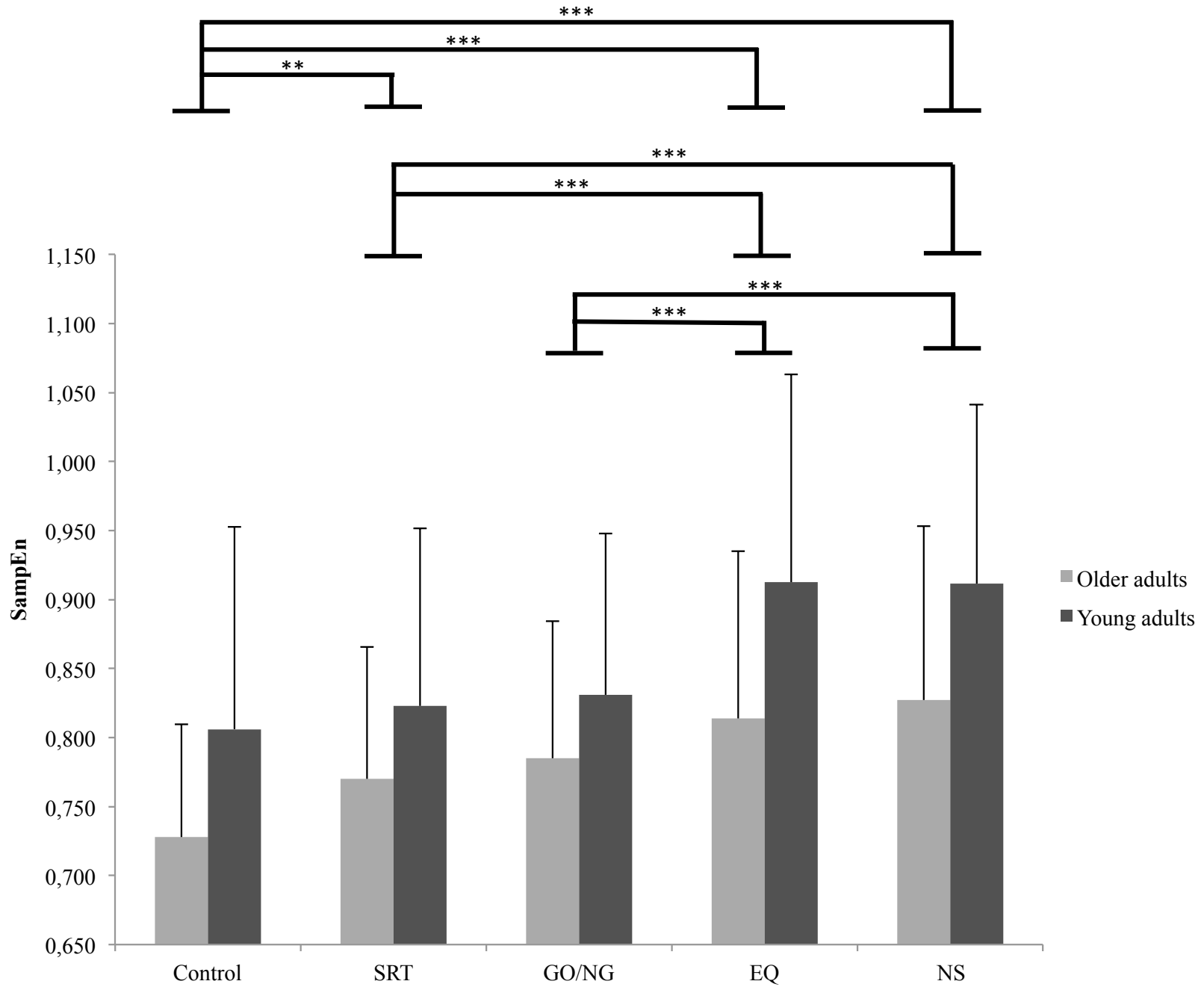


Figure 2.



Chapitre 4. Discussion

Le principal objectif de cette thèse était de comparer les effets de tâches cognitives sur le contrôle postural chez les jeunes adultes et les personnes âgées afin de confirmer le mode de contrôle postural privilégié dans un contexte de paradigme de double-tâche. L'objectif complémentaire était de valider deux conclusions présentes dans la littérature, soit que la stabilité posturale accrue observée lors de la performance d'une tâche cognitive chez les jeunes adultes soit aussi présente chez les personnes âgées et que la performance d'une tâche cognitive continue favorise une meilleure stabilité posturale qu'une tâche cognitive discrète.

Il a été proposé que les jeunes adultes démontreraient une plus grande stabilité posturale que les personnes âgées pour toutes les conditions (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Swan et al., 2004), mais que les deux groupes auraient une stabilité posturale accrue lors de la performance de la tâche cognitive (Andersson et al., 2002; Dault et al., 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003), et ce, de façon plus marquée lors de la performance des tâches cognitives continues (Polskaia et al., 2015). De plus, il était attendu que les valeurs de SampEn soient significativement plus élevées chez les jeunes adultes et les personnes âgées lors de la performance de tâches cognitives prouvant ainsi l'automatisation du contrôle postural (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009).

De façon générale, les hypothèses émises ont été corroborées. En effet, les résultats démontrent une plus grande variabilité et fréquence des oscillations, ainsi qu'une plus grande aire d'oscillation chez les personnes âgées en comparant avec les jeunes adultes. Lors de la performance des tâches cognitives, les personnes âgées et les jeunes adultes ont démontré une stabilité posturale accrue en comparant avec la condition contrôle. Chez les jeunes adultes, les tâches cognitives continues ont induit une meilleure stabilité posturale que les tâches cognitives discrètes, alors que chez les personnes âgées, les tâches cognitives continues et discrètes ont eu le même effet sur la stabilité posturale. Finalement, les valeurs d'entropie étaient plus grandes en antéropostérieur et en médiolatéral lors de la performance des tâches cognitives pour les deux groupes.

4.1 Stabilité posturale

L'un des principaux objectifs était de comparer les effets de tâches cognitives sur le contrôle postural chez des jeunes adultes et des personnes âgées. Chez les jeunes adultes, bien que la majorité des études ait rapporté une amélioration de la stabilité posturale (Andersson et al., 2002; Dault et al., 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003), d'autres ne rapportent aucun changement (Remaud et al., 2012) ou même une détérioration de celle-ci (Dault et al., 2003; Maylor et al., 2001; Melzer et al., 2001; Mitra & Fraizer, 2004; Pellecchia, 2003; Shumway-Cook et al., 1997; Woollacott & Velde, 2008; Yardley et al., 1999). Chez les personnes âgées, également peu de constance existe dans la littérature. Certains ont trouvé une détérioration de la posture (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2004, 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Melzer et al., 2001; Shumway-Cook et

al., 1997), alors que d'autres ont trouvé une amélioration de celle-ci (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004; Weeks et al., 2003) lors de la performance d'une tâche cognitive.

Il était attendu que les jeunes adultes aient une meilleure stabilité posturale que les personnes âgées dans toutes les conditions et que les deux groupes expérimentent une stabilité posturale accrue lors de la performance de tâches cognitives, et ce, de façon plus marquée lors de la performance des tâches cognitives continues.

4.1.1 Jeunes adultes

En accord avec l'hypothèse émise et avec la majorité des études (Andersson et al., 2002; Dault et al., 2003; Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Jehu et al., 2015; Kerr et al., 1985; Lajoie et al., 2015; Maylor et al., 2001; Polskaia & Lajoie, 2016; Polskaia et al., 2015; Prado et al., 2007; Riley et al., 2003, 2005; Siu & Woollacott, 2007; Stins et al., 2011; Swan et al., 2007, 2004; Weeks et al., 2003), la performance des tâches cognitives a amélioré la stabilité posturale des jeunes adultes. En effet, l'aire d'oscillation et la variabilité des oscillations en antéropostérieur sont restées constantes de la condition contrôle à la condition GO/NG, puis ont considérablement diminuées pour les conditions EQ et NS. De plus, la vitesse est restée constante pour toutes les conditions.

Les résultats permettent de renforcer l'implication du type de tâche cognitive sur la stabilité posturale. En effet, il a été proposé par Lajoie et ses collègues (2015) que les tâches cognitives continues génèrent une meilleure stabilité posturale que les tâches cognitives discrètes. Les plus basses valeurs d'aire de variabilité des oscillations en antéropostérieur observées ici lors

des tâches cognitives continues en comparant avec les tâches discrètes et la condition contrôle supportent les conclusions de Lajoie et ses collègues (2015). Les résultats soutiennent que les tâches continues permettent d'accroître la stabilité posturale en retirant les ressources attentionnelles de la posture de façon continue. Au contraire, les tâches cognitives discrètes génèrent une demande cognitive seulement de façon intermittente, laissant donc la possibilité à l'attention d'être parfois redirigée vers la tâche posturale (Lajoie et al., 2015). Toutefois, contrairement à Lajoie et ses collègues (2015), les résultats ne démontrent pas que les tâches discrètes augmentent la stabilité posturale en comparant avec la condition contrôle. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les tâches de temps de réaction (SRT et GO/NG) n'étaient pas assez demandantes au niveau attentionnel pour détourner pleinement l'attention des jeunes adultes de la tâche posturale. Une autre explication pourrait être que les tâches discrètes sollicitaient le parler. Ainsi, le fait de dire « top » dans les tâches de temps de réaction a pu annuler les effets bénéfiques d'une tâche cognitive sur la stabilité posturale, comme observé dans d'autres études impliquant la performance d'une tâche cognitive nécessitant le parler (Dault et al., 2003; Yardley et al., 1999).

Nos résultats supportent partiellement les conclusions que certaines études ont portées quant aux effets bénéfiques de performer des tâches cognitives ayant un niveau de difficulté élevé sur la stabilité posturale (Huxhold et al., 2006; Polskaia & Lajoie, 2016; Riley et al., 2003; Swan et al., 2007). En effet, les tâches continues, plus difficiles et demandant un niveau attentionnel plus élevé, ont généré une meilleure stabilité posturale que les tâches discrètes. Toutefois, à même les tâches discrètes et à même les tâches continues, la tâche considérée comme plus difficile n'a pas induit une meilleure stabilité posturale que la plus facile. En effet, la tâche GO/NG est considérée comme plus difficile que la tâche SRT, comme démontré par les temps de

réaction obtenus à chacune de ces tâches. Toutefois, sa performance a généré une stabilité posturale comparable à celle de la tâche SRT. De façon similaire, la tâche NS est considérée plus difficile que la tâche EQ, puisqu'elle a été caractérisée comme plus difficile par des participants à l'aide d'une mesure subjective (Lajoie et al., 2015) et a généré un plus grand taux d'erreurs, soit respectivement 47,4% et 19,5% (Lajoie et al., 2015). Toutefois, cette tâche n'a pas engendré une stabilité posturale accrue en comparant avec la tâche EQ. Ainsi, il est difficile de déterminer si la stabilité posturale plus élevée observée lors de la performance des tâches cognitives viendrait plutôt du type de tâches cognitives (c.-à-d. discrète ou continue) ou de la difficulté de celles-ci.

4.1.2 Personnes âgées

En accord avec l'hypothèse, ainsi qu'avec certaines études (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Maylor et al., 2001; Maylor & Wing, 1996; Prado et al., 2007; Swan et al., 2004; Weeks et al., 2003), la stabilité posturale a également été améliorée chez les personnes âgées lors de la performance de tâches cognitives. En effet, l'aire et la variabilité en antéropostérieur des oscillations ont diminué de la condition contrôle jusqu'à la condition GO/NG, puis sont restées constantes pour les conditions EQ et NS.

Contrairement à ce qui a été trouvé chez les jeunes adultes (Lajoie et al., 2015), les résultats démontrent que chez les personnes âgées, les tâches cognitives continues ne génèrent pas une stabilité posturale plus grande que les tâches cognitives discrètes. Les résultats semblent plutôt appuyer la relation en U qui semble exister entre les variables quantifiant la stabilité posturale et les demandes cognitives d'une tâche cognitive (Huxhold et al., 2006). En effet, il est possible d'observer une diminution de la variabilité et de l'aire des oscillations de la condition contrôle à SRT, puis de la condition SRT à GO/NG. Ainsi, les effets sur la stabilité posturale de

la performance des tâches cognitives discrètes semblent concorder avec la partie descendante du U. De plus, la stabilisation de la variabilité en antéropostérieur et de l'aire des oscillations posturales lors de la performance des tâches cognitives continues aux mêmes valeurs que la condition GO/NG laisse croire à une partie stable à la base de la fonction en U. Cette stabilisation pourrait venir d'une compétition de ressources entre la demande cognitive et la demande posturale lorsque les tâches cognitives augmentent en difficulté (c.-à-d. EQ et NS), ayant comme effet de ne plus améliorer la stabilité posturale. Cette interférence pourrait survenir dû au fait que les personnes âgées allouent davantage de ressources attentionnelles à leur posture (M. Woollacott & Shumway-Cook, 2002) et que leur fonction cognitive s'amointrit graduellement (Craik & Salthouse, 2008). Toutefois, il est important de noter que la compétition entre les ressources attentionnelles de la posture et de la tâche cognitive n'était pas assez importante pour générer une diminution dans la stabilité posturale, et donc, observer la partie ascendante du U.

4.1.3 Jeunes adultes versus personnes âgées

En accord avec l'hypothèse émise ainsi qu'avec la littérature (Huxhold et al., 2006; Laughton et al., 2003; Maylor et al., 2001; Prado et al., 2007; Whipple, Wolf, Derby, Singh & Tobin, 1993), les personnes âgées étaient moins stables que les jeunes adultes pour toutes les conditions, comme démontré par des plus grandes valeurs pour l'aire, la variabilité et la fréquence des oscillations. Ceci peut être expliqué par la dégénération des systèmes sensorimoteurs associée au vieillissement normal, et ce, même sans présence de maladies (Borel & Alescio-Lautier, 2014; Horak, Shupert & Mirka, 1989; Massion, 1994).

Plus précisément, alors que la stabilité posturale des jeunes adultes s'est continuellement améliorée de la condition contrôle aux tâches cognitives discrètes, puis aux tâches cognitives

continues, la stabilité posturale des personnes âgées s'est améliorée de la condition contrôle, à la condition SRT, puis GO/NG, mais s'est ensuite stabilisée pour les tâches cognitives continues. Ceci laisse croire que les personnes âgées semblent atteindre un plateau de stabilité posturale pour les tâches cognitives continues, alors que les jeunes adultes accroît davantage leur stabilité posturale pour ces tâches cognitives. Ainsi, les résultats supportent une supposition faite par Huxhold et ses collègues (2006) selon laquelle c'est davantage la capacité attentionnelle de chacun qui semble déterminer si une même tâche cognitive est bénéfique ou nuisible pour la stabilité posturale d'un individu.

De façon générale, les résultats supportent partiellement ou ne supportent pas les modèles théoriques tentant d'expliquer les résultats obtenus dans les études utilisant les tâches cognitives pour définir la relation entre le système postural et le système cognitif. En effet, le premier modèle, soit celui de la compétition des ressources, stipule qu'une compétition existerait entre les ressources attentionnelles destinées à la tâche posturale et à la tâche cognitive, menant à une dégradation de la performance posturale ou cognitive (Lacour et al., 2008). Il est tout d'abord important de mentionner qu'ici, une dégradation de la performance cognitive était peu probable puisqu'un maximum d'erreurs était alloué, sinon l'essai était refait. Ainsi, les résultats des jeunes adultes ne supportent pas le modèle de compétition des ressources puisque les tâches cognitives continues ont démontré le plus grand effet bénéfique sur la stabilité posturale. Chez les personnes âgées, il semble avoir une compétition entre les ressources attentionnelles allouées à la posture et à la tâche cognitive lors de la performance des tâches cognitives continues. Toutefois, cette interférence ne s'est pas avérée assez importante pour engendrer une dégradation de la posture.

Les résultats obtenus chez les jeunes adultes semblent supporter partiellement la relation en U existant entre les variables quantifiant la stabilité posturale et les demandes cognitives (Huxhold et al., 2006; Lacour et al., 2008), et plus particulièrement, la partie descendante de cette relation. En effet, chez les jeunes adultes, la demande attentionnelle des tâches discrètes ne semblait pas être suffisante pour induire quelconque effet sur la stabilité posturale, alors que les tâches continues, plus difficiles, ont induit une stabilisation accrue. Chez les personnes âgées, les résultats semblent également supporter la partie descendante du U et semble démontrer l'existence d'une partie stable à la base du U. Toutefois, les tâches cognitives utilisées ici n'ont pas démontré des effets néfastes sur la stabilité posturale, n'appuyant donc pas la partie ascendante du U.

Finalement, les résultats ne supportent pas le modèle de priorisation selon lequel le contrôle postural serait privilégié au détriment de la performance cognitive dans un paradigme de double-tâche (Lacour et al., 2008). En effet, selon ce modèle, une détérioration dans la performance des tâches cognitives serait présente lors de leur performance simultanée à la tâche posturale. Ici, ceci n'a pas été testé. Toutefois, les participants pouvaient faire seulement un certain nombre d'erreurs, assurant ainsi une performance adéquate et équivalente entre participants, et ce, pour chaque tâche cognitive. Ainsi, chez les jeunes adultes et les personnes âgées, les résultats démontreraient plutôt que la tâche cognitive ait été priorisée, permettant ainsi une possible automatisation du contrôle postural.

4.2 Complexité posturale

L'objectif principal de cette thèse était de confirmer le mode de contrôle postural privilégié lors de la performance de tâches cognitives en utilisant la SampEn chez des jeunes

adultes et des personnes âgées. La majorité des études réalisées chez les jeunes adultes semble démontrer une augmentation de la SampEn lors de la performance d'une tâche cognitive, suggérant un mode automatisé du contrôle de la posture, lorsque combinée avec une stabilité posturale accrue (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009). Toutefois, chez les personnes âgées, les quelques études démontrent plutôt une diminution de la SampEn lors de la performance d'une tâche cognitive (Kang et al., 2009; Manor et al., 2010) ou une augmentation de celle-ci (Roerdink et al., 2006).

L'hypothèse émise était que les valeurs de SampEn seraient significativement plus élevées lors de la performance de tâches cognitives prouvant l'automatisation du contrôle postural chez les jeunes adultes (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009) et les personnes âgées. Cette hypothèse, chez les personnes âgées, était basée sur les résultats d'une étude (Roerdink et al., 2006). et sur le fait qu'une amélioration posturale était attendue lors de la performance de tâches cognitives suggérant une automatisation du contrôle postural, et donc, que basé sur les études faites chez les jeunes adultes (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007; Stins et al., 2009), les valeurs de SampEn représentant cette automatisation sont élevées.

4.2.1 Jeunes adultes versus personnes âgées

En accord avec la littérature, les valeurs de SampEn observées étaient plus élevées chez les jeunes adultes que chez les personnes âgées, signifiant que les oscillations posturales des jeunes adultes sont plus complexes et plus irrégulières que celles des personnes âgées.

Ces résultats supportent l'hypothèse de la perte de complexité proposée par Lipsitz et Goldberger (1992), selon laquelle les changements dans l'organisation et dans la fonction des

différents systèmes humains liés au vieillissement amènent une diminution dans la complexité. Alors que plusieurs études ont soutenu cette hypothèse au niveau du système cardiaque (Bigger et al., 1996; Ho et al., 1997; Makikallio et al., 2004), les résultats obtenus ici permettent de transposer cette hypothèse au contrôle postural. En effet, les valeurs de SampEn des personnes âgées étaient plus basses que celles des jeunes adultes, possiblement attribuables à une diminution du nombre de degrés de liberté impliqués dans le maintien postural chez les personnes âgées, résultant en des oscillations posturales plus régulières et en un système du contrôle postural moins complexe (Newell & Molenaar, 2014). Cette diminution de degrés de liberté peut provenir de plusieurs aspects liés au vieillissement tel, la perte de sensibilité des récepteurs sensoriels, résultant en une diminution dans la quantité d'informations sensorielles reçues (Horak et al., 1989), l'altération de la force et de l'élasticité musculaire (Massion, 1994), la réduction de la portée des mouvements articulaires (Jette, Branch & Berlin, 1990) et l'augmentation de la co-activation des muscles agonistes et antagonistes des chevilles (Massion, 1994; Woollacott & Shumway-Cook, 1990).

4.2.2 Mode du contrôle postural

Chez les jeunes adultes, les résultats obtenus à partir des mesures davantage traditionnelles du contrôle postural peuvent laisser croire que la stabilité posturale accrue observée lors de la performance des tâches cognitives continues est attribuable à une stratégie de raidissement des chevilles. En effet, combinés à la diminution de l'aire d'oscillation et de la variabilité des oscillations, les résultats démontrent une augmentation de la fréquence des oscillations en antéropostérieur davantage marquée pour les tâches cognitives continues. Il est donc possible de croire que les muscles des chevilles se sont co-contractés lors de la performance des tâches cognitives afin d'augmenter la stabilité posturale, et ce, pour permettre aux ressources

attentionnelles d'être dirigée vers la tâche cognitive (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002). Comme Roerdink et ses collègues (2006) l'ont démontré, l'augmentation de la vitesse des oscillations, combinée à une augmentation de la fréquence et de la stabilité posturale, démontrerait l'adoption d'une stratégie de raidissement des chevilles. Toutefois, nos résultats démontrent une vitesse du centre de pression constante pour toutes les conditions. Ainsi, il semble peu probable que les jeunes adultes aient raidi leurs muscles de chevilles dans le but de diriger leurs ressources attentionnelles vers la tâche cognitive, mais plutôt qu'ils aient automatisé le contrôle de leur posture.

Chez les personnes âgées, l'amélioration de la stabilité posturale observée lors de la performance de tâches cognitives discrètes semble pouvoir être expliquée par l'automatisation du contrôle postural due aux ressources attentionnelles dirigées sur la tâche cognitive et sur la tâche posturale (Huxhold et al., 2006; Jamet et al., 2007; Swan et al., 2004). Toutefois, cette explication semble moins juste pour expliquer les résultats observés aux conditions où les tâches cognitives étaient de type continu. En effet, l'augmentation dans la fréquence des oscillations en antéropostérieur des tâches discrètes à continues, combiné à l'augmentation soudaine de la vitesse en antéropostérieur et médiolatéral pour la condition EQ, puis NS, semble laisser croire que les personnes âgées adoptent une stratégie de raidissement des chevilles lors de la performance des tâches cognitives continues (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002; Roerdink et al., 2006).

Toutefois, en accord avec l'hypothèse émise, les résultats ont démontré des valeurs de SampEn plus élevées en antéropostérieur et en médiolatéral lors de la performance de tâches cognitives. En effet, la SampEn était plus élevée lors de la performance des tâches cognitives

discrètes en comparant avec la condition contrôle. De plus, les tâches cognitives continues ont mené à une SampEn plus élevée en comparant avec la condition contrôle et avec les tâches cognitives discrètes. Ceci signifie que les oscillations posturales étaient plus complexes et irrégulières selon l'ordre croissant suivant : condition contrôle, tâches cognitives discrètes et tâches cognitives continues.

Cavanaugh et ses collègues (2007) ont proposé qu'une augmentation de l'entropie combinée à une augmentation de la stabilité posturale, lors de la performance d'une tâche cognitive concurrente à une tâche posturale permettent d'identifier l'adoption d'un mode automatique du contrôle de la posture. Ainsi, les résultats obtenus ici permettent de confirmer l'automatisation du contrôle postural lors de la performance de tâches cognitives chez les jeunes adultes et les personnes âgées. La complexité posturale accrue semble provenir du déplacement de l'attention vers la tâche cognitive, permettant ainsi aux processus automatiques régulant la posture d'opérer sans contraintes (Cavanaugh et al., 2007; Donker et al., 2007).

Chez les jeunes adultes, l'augmentation des valeurs de SampEn observée entre les tâches cognitives discrètes et les tâches cognitives continues semblent démontrer que le déplacement de l'attention vers la tâche cognitive est plus prononcé lors de la performance des tâches cognitives continues en comparant avec celles discrètes. Ces résultats permettent donc de confirmer que les tâches cognitives continues occupent l'attention de façon davantage continue que les tâches cognitives discrètes, laissant ainsi moins d'opportunités aux individus pour contrôler consciemment leur posture (Lajoie et al., 2015). Les résultats permettent également de supporter, chez les jeunes adultes, la corrélation positive existant entre la quantité de ressources attentionnelles portée au contrôle postural et la régularité des oscillations posturales (Donker et

al., 2007). En effet, les résultats démontrent que plus l'attention était déviée de la posture, en performant les tâches cognitives discrètes, puis continues, plus les oscillations posturales étaient irrégulières.

Chez les personnes âgées, les résultats obtenus corroborent les résultats d'une étude (Roerdink et al., 2006) et contredisent ce qui a été trouvé par certaines autres études (Kang et al., 2009; Manor et al., 2010). En effet, les résultats démontrent que les personnes âgées sont capables d'allouer leurs ressources attentionnelles à la tâche cognitive, permettant ainsi l'adoption d'un mode de contrôle de la posture automatisé. Bien que les personnes âgées semblent atteindre un plateau de stabilité posturale lors de la performance des tâches cognitives continues, l'augmentation de la SampEn, observée pour ces conditions, suggère tout de même qu'ils adoptent un contrôle postural automatique, même lors de la performance des tâches cognitives les plus difficiles.

4.2.3 Interprétation de la stabilité posturale accrue

Une stabilité posturale accrue combinée à augmentation de la fréquence d'oscillations (Dault et al., 2003; McNevin & Wulf, 2002; Melzer et al., 2001) et de la vitesse (Roerdink et al., 2006) a été associée à l'adoption d'une stratégie de raidissement des chevilles. Les résultats obtenus ici chez les personnes âgées et jeunes adultes démontrent une diminution de l'aire et de la variabilité des oscillations, ainsi qu'une augmentation de la fréquence d'oscillation lors de la performance des tâches cognitives continues en comparant avec la condition contrôle. Chez les personnes âgées, une augmentation de la vitesse des oscillations a également été observée lors de la performance des tâches cognitives continues. Comme mentionné dans les sections ultérieures, ces résultats pourraient être interprétés comme une stratégie de raidissement des

chevilles. Cette stratégie consiste à co-contracter les muscles de la cheville et son adoption amène donc une diminution du nombre de degrés de liberté à contrôler (Melzer et al., 2001; Winter et al., 1998). L'adoption de la stratégie de raidissement des chevilles serait donc reflétée par une diminution des valeurs de SampEn. Toutefois, il est important de noter que les résultats démontrent que la SampEn a continuellement augmenté de la condition contrôle aux conditions impliquant les tâches cognitives continues. Ainsi, les résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle la stabilité posturale accrue lors de la performance de tâches cognitives n'est pas le résultat d'un raidissement des chevilles, mais plutôt de l'automatisation du contrôle postural. L'interprétation du mode de contrôle postural utilisé ne devrait donc pas être faite seulement avec des mesures spatiales et davantage traditionnelles du centre de pression, mais plutôt conjointement avec des mesures entropiques, telle la SampEn.

4.3 Résumé des résultats

Les résultats obtenus démontrent que les jeunes adultes ont une meilleure stabilité posturale que les personnes âgées peu importe les conditions. La performance de tâches cognitives a induit une amélioration de la stabilité posturale chez les jeunes adultes et les personnes âgées. Chez les jeunes adultes, les tâches cognitives discrètes n'ont pas modifié la stabilité posturale, mais les tâches cognitives continues ont induit une amélioration de celle-ci. Chez les personnes âgées, la stabilité posturale a augmenté lors de la performance des tâches cognitives discrètes, mais s'est stabilisée lors de la performance des tâches cognitives continues.

Toutefois, le plus important résultat réside en la confirmation de l'adoption d'un mode de contrôle postural automatique chez les jeunes adultes et les personnes âgées lors de la performance des tâches cognitives, comme démontré par une augmentation de la stabilité

posturale et de la complexité des oscillations posturales. Finalement, nos résultats suggèrent que l'interprétation des effets de la performance d'une tâche cognitive sur le contrôle postural ne devrait pas se baser seulement sur les mesures spatiales et davantage traditionnelles du centre de pression, mais également sur des mesures entropiques, telle la SampEn.

Chapitre 5. Conclusion

5.1 Contribution à la littérature

Les résultats de cette thèse contribuent à la compréhension de l'interaction entre les processus posturaux et les processus cognitifs. Premièrement, la performance d'une tâche cognitive améliore la stabilité posturale, non seulement chez des jeunes adultes, mais également chez des personnes âgées. Deuxièmement, les résultats permettent de renforcer la littérature stipulant que la stabilité posturale accrue provient des ressources attentionnelles portées à la tâche cognitive, et ce, en confirmant, à l'aide de la SampEn, l'automatisation du contrôle postural lors de la performance d'une tâche cognitive chez les jeunes adultes et les personnes âgées. Finalement, les résultats suggèrent que la stabilité accrue associée à la performance d'une tâche cognitive ne devrait pas être interprétée seulement à partir des mesures spatiales du centre de pression, mais plutôt conjointement avec des mesures entropiques, telle la SampEn.

5.2 Études futures

En se basant sur les résultats obtenus, les études futures voulant étudier le contrôle postural dans un paradigme de double-tâche chez les jeunes adultes devraient utiliser des tâches cognitives continues, puisque celles-ci semblent assurer un effet sur la stabilité posturale. D'autre part, il serait intéressant que l'entropie soit davantage utilisée comme mesure quantifiant le contrôle postural, et ce, surtout chez les personnes âgées. Des études pourraient également tenter de déterminer le réel impact de la modalité sensorielle ou de la difficulté de la tâche cognitive sur la stabilité posturale en utilisant la SampEn. Celle-ci devrait également être utilisée pour étudier spécifiquement la stratégie de raidissement des chevilles, ainsi que la complexité des oscillations posturales lorsqu'une telle stratégie est employée.

5.3 Limitations

Il est important de mentionner les limitations inhérentes à cette thèse. Tout d'abord, bien qu'il soit désiré que les participants soient les plus représentatifs possibles de la population, certaines limitations sont présentes à ce niveau. En effet, il est possible que les personnes âgées ayant participé à cette étude soient davantage en santé, physique et psychologique, que la moyenne de la population âgée. D'autre part, la performance aux tâches cognitives n'a pas été évaluée avant de procéder aux différentes conditions. Il serait intéressant de pouvoir comparer cette performance à celle des tâches cognitives durant les conditions, afin d'étudier l'interaction entre les ressources attentionnelles allouées à la tâche cognitive et posturale. Finalement, il serait nécessaire de trouver d'autres tâches cognitives discrètes ne nécessitant pas le parler puisque le fait d'articuler a pu interférer avec la stabilité posturale des participants.

Références

- Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(3), 715–728. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>
- Andersson, G., Hagman, J., Talianzaded, R., Svedberg, A., & Larsen, H. C. (2002). Effect of cognitive load on postural control. *Brain Research Bulletin*, 58(1), 135–139. [http://doi.org/10.1016/S0361-9230\(02\)00770-0](http://doi.org/10.1016/S0361-9230(02)00770-0)
- Barra, J., Bray, A., Sahni, V., Golding, J. F., & Gresty, M. A. (2006). Increasing cognitive load with increasing balance challenge : recipe for catastrophe. *Experimental Brain Research*, 174, 734–745. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0519-2>
- Bigger, J. T., Steinman, R. C., Rolnitzky, L. M., Fleiss, J. L., Albrecht, P., & Cohen, R. J. (1996). Power Law Behavior of RR-Interval Variability in Healthy Middle-Aged Persons, Patients With Recent Acute Myocardial Infarction, and Patients With Heart Transplants. *Circulation*, 93(12), 2142–2151. <http://doi.org/10.1161/01.CIR.93.12.2142>
- Borel, L., & Alescio-Lautier, B. (2014). Posture and cognition in the elderly: Interaction and contribution to the rehabilitation strategies. *Neurophysiologie Clinique*, 44(1), 95–107. <http://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.129>
- Brown, L. a, Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (1999). Attentional demands and postural recovery: the effects of aging. *The Journals of Gerontology: MEDICAL SCIENCES*, 54A(4), M165–M171. <http://doi.org/10.1093/gerona/54.4.M165>
- Cavanaugh, J. T. (2005). Detecting altered postural control after cerebral concussion in athletes with normal postural stability. *British Journal of Sports Medicine*, 39(11), 805–811. <http://doi.org/10.1136/bjism.2004.015909>

- Cavanaugh, J. T., Guskiewicz, K. M., Giuliani, C., Marshall, S., Mercer, V. S., & Stergiou, N. (2006). Recovery of postural control after cerebral concussion: New insights using approximate entropy. *Journal of Athletic Training, 41*(3), 305–313. [http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/j.pmrj.2009.03.011](http://doi.org/doi:10.1016/j.pmrj.2009.03.011)
- Cavanaugh, J. T., Mercer, V. S., & Stergiou, N. (2007). Approximate entropy detects the effect of a secondary cognitive task on postural control in healthy young adults: a methodological report. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 4*(1), 42. <http://doi.org/10.1186/1743-0003-4-42>
- Costa, M., Priplata, A. A., Lipsitz, L. A., Wu, Z., Huang, N. E., Goldberger, A. L., & Peng, C.-K. (2008). Noise and poise: Enhancement of postural complexity in the elderly with a stochastic-resonance-based therapy. *Europhys Lett., 15*(10), 1203–1214. <http://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2008.02.002.A>
- Craik, F. I. M., & Salthouse, T. A. (2008). *The handbook of aging and cognition. Psychology Press* (Vol. 23). <http://doi.org/10.1002/acp.1505>
- Dault, M. C., Geurts, A. C. H., Mulder, T. W., & Duysens, J. (2001). Postural control and cognitive task performance in healthy participants while balancing on different support-surface configurations. *Gait and Posture, 14*(3), 248–255. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00130-8](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00130-8)
- Dault, M. C., Yardley, L., & Frank, J. S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Cognitive Brain Research, 16*, 434–440.
- 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. <http://doi.org/10.1007/s00221-007-0905-4>
- Fraizer, E. V., & Mitra, S. (2008). Methodological and interpretive issues in posture-cognition

- dual-tasking in upright stance. *Gait and Posture*, 27(2), 271–279.
<http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.04.002>
- Gage, W. H., Winter, D. A., Frank, J. S., & Adkin, A. L. (2004). Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing. *Gait & Posture*, 19(2), 124–32.
[http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(03\)00037-7](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(03)00037-7)
- Geursen, J.-B., Altena, D., Massen, C.-H., & Verduin, M. (1976). A model of the standing man for the description of his dynamic behaviour.pdf. *Symposium International de Posturographie*.
- Guttentag, R. E. (1989). Age differences in dual-task performance: Procedures, assumptions, and results. *Developmental Review*, 9(2), 146–170. [http://doi.org/10.1016/0273-2297\(89\)90027-0](http://doi.org/10.1016/0273-2297(89)90027-0)
- Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Developmental Psychobiology*, 42(4), 368–377.
<http://doi.org/10.1002/dev.10110>
- Ho, K. K. L., Moody, G. B., Peng, C.-K., Mietus, J. E., Larson, M. G., Levy, D., & Goldberger, A. L. (1997). Predicting Survival in Heart Failure Case and Control Subjects by Use of Fully Automated Methods for Deriving Nonlinear and Conventional Indices of Heart Rate Dynamics. *Circulation*, 96(3), 842–848. <http://doi.org/10.1161/01.CIR.96.3.842>
- Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, 35(Supplement 2), ii7-ii11.
<http://doi.org/10.1093/ageing/afl077>
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381.
<http://doi.org/3734861>

- Horak, F. B., Shupert, C. L., & Mirka, A. (1989). Components of Postural Dyscontrol in the Elderly : A Review. *Neurobiology of Aging*, *10*, 727–738.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.01.002>
- Jamet, M., Deviterne, D., Gauchard, G. C., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2004). Higher visual dependency increases balance control perturbation during cognitive task fulfilment in elderly people. *Neuroscience Letters*, *359*, 61–64.
<http://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.02.010>
- Jamet, M., Deviterne, D., Gauchard, G. C., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2007). Age-related part taken by attentional cognitive processes in standing postural control in a dual-task context. *Gait and Posture*, *25*(2), 179–184. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.03.006>
- Jehu, D. A., Despons, A., Paquet, N., & Lajoie, Y. (2015). Prioritizing attention on a reaction time task improves postural control and reaction time. *International Journal of Neuroscience*, *125*(2), 100–106. <http://doi.org/10.3109/00207454.2014.907573>
- Jette, A. M., Branch, L. G., & Berlin, J. (1990). Musculoskeletal impairments and physical disablement among the aged. *Journal of Gerontology*, *45*(6), M203–M208.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. *The American Journal of Psychology* (Vol. 88).
<http://doi.org/10.2307/1421603>
- Kang, H. G., Costa, M. D., Priplata, A. A., Starobinets, O. V., Goldberger, A. L., Peng, C.-K., ... Lipsitz, L. A. (2009). Frailty and the Degradation of Complex Balance Dynamics During a Dual-Task Protocol. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *64*(12), 1304–1311. <http://doi.org/10.1093/gerona/glp113>
- Kerr, B., Condon, S. M., & McDonald, L. A. (1985). Cognitive spatial processing and the

- regulation of posture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 617–622. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.11.5.617>
- Lacour, M., Barthelemy, J., Borel, L., Magnan, J., Xerri, C., Chays, A., & Ouaknine, M. (1997). Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Experimental Brain Research*, 115, 300–310.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lajoie, Y., Jehu, D. A., Richer, N., & Chan, A. (n.d.). Continuous and difficult discrete cognitive tasks promote improved stability in older adults.
- Lajoie, Y., Richer, N., Jehu, D. A., & Tran, Y. (2015). Continuous Cognitive Tasks Improve Postural Control Compared to Discrete Cognitive Tasks to Discrete Cognitive Tasks. *Journal of Motor Behavior*, 0(0). <http://doi.org/10.1080/00222895.2015.1089833>
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1993). Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*, 97(1), 139–144. <http://doi.org/10.1007/BF00228824>
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1996). Upright Standing and Gait: Are There Changes in Attentional Requirements Related to Normal Aging? *Experimental Aging Research*, 22(2), 185–198. <http://doi.org/10.1080/03610739608254006>
- Laughton, C. A., Slavin, M., Katdare, K., Nolan, L., Bean, J. F., Kerrigan, D. C., ... Collins, J. J. (2003). Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. *Gait & Posture*, 18, 101–108. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00200-X](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00200-X)
- Li, K. Z. H., & Lindenberger, U. (2002). Relations between aging sensory / sensorimotor and

- cognitive functions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26, 777–783.
- Lipsitz, L. A. (2004). Physiological complexity, aging, and the path to frailty. *Science of Aging Knowledge Environment : SAGE KE*, 2004(16), pe16.
<http://doi.org/10.1126/sageke.2004.16.pe16>
- Lipsitz, L. a., & Goldberger, A. L. (1992). Loss of “Complexity” and Aging Potential Applications of Fractals and Chaos theory to Senescence. *The Journal of the American Medical Association*, 267(13), 1806–1809.
<http://doi.org/10.1001/jama.1992.03480130122036>
- Makikallio, A. M., Makikallio, T. H., Korpelainen, J. T., Sotaniemi, K. A., Huikuri, H. V., & Myllyla, V. V. (2004). Heart rate dynamics predict poststroke mortality. *Neurology*, 62(10), 1822–1826. <http://doi.org/10.1212/01.WNL.0000125190.10967.D5>
- Manor, B., Costa, M. D., Hu, K., Newton, E., Starobinets, O., Kang, H. G., ... Lipsitz, L. a. (2010). Physiological complexity and system adaptability: evidence from postural control dynamics of older adults. *Journal of Applied Physiology*, 109, 1786–1791.
<http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00390.2010>
- Marchese, R., Bove, M., & Abbruzzese, G. (2003). Effect of Cognitive and Motor Tasks on Postural Stability in Parkinson ’ s Disease : A Posturographic Study, 18(6), 652–658.
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 877–887.
[http://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](http://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6)
- Maylor, E. A., Allison, S., & Wing, A. M. (2001). Effects of spatial and nonspatial cognitive activity on postural stability. *British Journal of Psychology*, 92, 319–338.
<http://doi.org/10.1348/000712601162211>
- Maylor, E. A., & Wing, A. M. (1996). Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 51B(3),

143–154. <http://doi.org/10.1093/geronb/51B.3.P143>

McNevin, N. H., Shea, C. H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research*, *67*, 22–29.

<http://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31823f275c>

McNevin, N. H., & Wulf, G. (2002). Attentional focus on supra-postural tasks affects postural control. *Human Movement Science*, *21*, 187–202. [http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(02\)00095-7](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(02)00095-7)

Melzer, I., Benjuya, N., & Kaplanski, J. (2001). Age-related changes of postural control : Effect of cognitive tasks. *Gerontology*, *47*, 189–194.

Mitra, S., & Fraizer, E. V. (2004). Effects of explicit sway-minimization on postural – suprapostural dual-task performance. *Human Movement Science*, *23*, 1–20.

<http://doi.org/10.1016/j.humov.2004.03.003>

Moghadam, M., Ashayeri, H., Salavati, M., Sarafzadeh, J., Taghipoor, K. D., Saeedi, A., & Salehi, R. (2011). Reliability of center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait & Posture*, *33*(4), 651–5. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.016>

Murray, M. P., Seireg, A., & Scholl, R. C. (1967). Center of gravity, center of pressure, and supportives forces during human activities. *Journal of Applied Physiology*, *23*(6), 8–11.

Newell, K. M., & Molenaar, P. C. M. (2014). *Applications of Nonlinear Dynamics To Developmental Process Modeling*. Retrieved from

<https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=WR4BAwAAQBAJ&pgis=1>

Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*(2), 220–244. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.116.2.220>

Patel, M., Fransson, P. A., Lush, D., Petersen, H., Magnusson, M., Johansson, R., ... Johansson,

- R. (2008). The effects of foam surface properties on standing body movement. *Acta Oto-Laryngologica*, 128(9), 952–960. <http://doi.org/10.1080/00016480701827517>
- Pellecchia, G. L. (2003). Postural sway increases with attentional demands of concurrent cognitive task. *Gait & Posture*, 18, 29–34. [http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(02\)00138-8](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(02)00138-8)
- Pincus, S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(6), 2297–2301. <http://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>
- Pincus, S. M., & Goldberger, A. L. (1994). Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? *The American Journal of Physiology*, 266(4 Pt 2), H1643–H1656.
- Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2016). Reducing postural sway by concurrently performing challenging cognitive tasks. *Human Movement Science*, 46, 177–183. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2015.12.013>
- Polskaia, N., Richer, N., Dionne, E., & Lajoie, Y. (2015). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention. *Gait & Posture*, 41, 454–458. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.11.009>
- Prado, J. M., Stoffregen, T. A., & Duarte, M. (2007). Postural Sway during Dual Tasks in Young and Elderly Adults. *Gerontology*, 53, 274–281. <http://doi.org/10.1159/000102938>
- Ramdani, S., Seigle, B., Lagarde, J., Bouchara, F., & Bernard, P. L. (2009). On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. *Medical Engineering & Physics*, 31(8), 1023–31. <http://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.06.004>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional Demands Associated With Postural Control Depend on Task Difficulty and Visual Condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5), 329–340. <http://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Richer, N., Saunders, D., Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). *Gait & Posture* The effects of

- attentional focus and cognitive tasks on postural sway may be the result of automaticity. *Gait & Posture*, 54, 45–49. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.022>
- 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, H2039–H2049.
- Riley, M. A., Baker, A. A., & Schmit, J. M. (2003). Inverse relation between postural variability and difficulty of a concurrent short-term memory task. *Brain Research Bulletin*, 62, 191–195. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2003.09.012>
- Riley, M. A., Baker, A. A., Schmit, J. M., & Weaver, E. (2005). Effects of visual and auditory short-term memory tasks on the spatiotemporal dynamics and variability of postural sway. *Journal of Motor Behavior*, 37(4), 311–324. <http://doi.org/10.3200/JMBR.37.4.311-324>
- 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, 256–269. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0441-7>
- Rubenstein, L. Z. (2006). Falls in older people : epidemiology, risk factors and strategies for prevention. *Age and Ageing*, 35(S2), 37–41. <http://doi.org/10.1093/ageing/afl084>
- Schieppati, M., Hugon, M., Grasso, M., Nardone, A., & Galante, M. (1994). The limits of equilibrium in young and elderly normal subjects and in parkinsonians. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/ Evoked Potentials*, 93(4), 286–298. [http://doi.org/10.1016/0168-5597\(94\)90031-0](http://doi.org/10.1016/0168-5597(94)90031-0)
- Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The Effects of Two Types of Cognitive Tasks on Postural Stability in Older Adults With and Without a History of Falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*,

- 52A(4), M232–M240. <http://doi.org/10.1093/gerona/52A.4.M232>
- Siu, K.-C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait & Posture*, *25*(1), 121–126. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, *30*, 869–888. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.04.001>
- Stins, J. F., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2011). To freeze or not to freeze? Affective and cognitive perturbations have markedly different effects on postural control. *Human Movement Science*, *30*, 190–202. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.013>
- Swan, L., Otani, H., & Loubert, P. V. (2007). Reducing postural sway by manipulating the difficulty levels of a cognitive task and a balance task. *Gait and Posture*, *26*(3), 470–474. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.11.201>
- Swan, L., Otani, H., Loubert, P. V., Sheffert, S. M., & Dunbar, G. L. (2004). Improving balance by performing a secondary cognitive task. *British Journal of Psychology*, *95*, 31–40. <http://doi.org/10.1348/000712604322779442>
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2000). The dynamics of resting and postural tremor in Parkinson's disease. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 2046–2056. [http://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00467-3](http://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00467-3)
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiol Aging*, *23*(1), 1–11.

[http://doi.org/10.1016/S0197-4580\(02\)00052-0](http://doi.org/10.1016/S0197-4580(02)00052-0)

Weeks, D. L., Forget, R., Mouchnino, L., Gravel, D., & Bourbonnais, D. (2003). Interaction between attention demanding motor and cognitive tasks and static postural stability.

Gerontology, 49, 225–232. <http://doi.org/10.1159/000070402>

Whipple, R., Wolf, L., Derby, C., Singh, D., & Tobin, J. (1993). Altered Sensory Function and Balance in Older Persons. *The Journal of Gerontology*, 48(Special Issue), 71–76.

Winter, D. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, 3(4), 193–214. [http://doi.org/10.1016/0966-6362\(96\)82849-9](http://doi.org/10.1016/0966-6362(96)82849-9)

Winter, D. A., Patla, A. E., Prince, F., Ishac, M., & Gielo-Perczak, K. (1998). Stiffness Control of Balance in Quiet Standing. *Journal of Neurophysiology*, 80(3), 1211–1221.

[http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(97\)83378-4](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(97)83378-4)

Woollacott, M. H., & Shumway-Cook, A. (1990). Changes in posture control across the life span—a systems approach. *Physical Therapy*, 70(12), 799–807.

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

[http://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00156-4](http://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4)

Woollacott, M., & Velde, T. J. Vander. (2008). Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain Research*, 1208, 95–102.

<http://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.03.005>

Wulf, G. (2007). Attentional focus and motor learning: a review of 10 years of research. *E-Journal Bewegung Und Training*, 1, 1–64.

Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*,

54A(4), 1143–1154. <http://doi.org/10.1080/0272498014300011>

Wulf, G., Mercer, J., McNevin, N., & Guadagnoli, M. A. (2004). Reciprocal Influences of Attentional Focus on Postural and Suprapostural Task Performance. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 189–199. <http://doi.org/10.3200/JMBR.36.2.189-199>

Yardley, L., Gardner, M., Leadbetter, A., & Lavie, N. (1999). Effect of articulatory and mental tasks on postural control. *NeuroReport*, 10(2), 215–219. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1689046>

Annexe I. Questionnaire de santé

ID: _____

Questionnaire de santé

Nom: _____ Âge: _____ Sexe: _____

Nombre d'années d'éducation: _____ Grandeur: _____ Poids: _____

Est-ce que vous marchez avec un dispositif d'assistance? Oui: _____ Non: _____

Cochez tout ce qui s'applique ou s'est déjà appliqué à vous :

Maladie de Parkinson	_____	Ostéoporose	_____
Sclérose en plaques	_____	Arthrose	_____
Accident vasculaire cérébral	_____	Arthrite	_____
Crise cardiaque	_____	Hypertension artérielle	_____
Vertige	_____	Autre (SVP indiquez)	_____

Avez-vous des chutes dans les dernier 6 mois? Oui: _____ Non: _____

Si oui, combien de fois? _____

Décrivez les chute(s):


Écrivez la liste des médicaments et pourquoi vous les prenez :

Annexe II. Mini-mental state evaluation

Mini Mental State Exam (MMSE)

ID #: _____

Date: _____

Question	Temps	Score
En quelle année sommes-nous?	10 secondes	/1
En quelle saison?	10 secondes	/1
En quel mois?	10 secondes	/1
Quel jour du mois?	10 secondes	/1
Quel jour de la semaine?	10 secondes	/1
Dans quel pays sommes-nous ici?	10 secondes	/1
Dans quelle province?	10 secondes	/1
Dans quelle ville?	10 secondes	/1
Quel est le nom de cet édifice où nous sommes?	10 secondes	/1
À quel étage sommes-nous ici?	10 secondes	/1
Je vais vous dire 3 mots. Je voudrais que vous me les répétiez et que vous essayiez de les retenir car je vous les redemanderai tout à l'heure. cigare/fleur/porte. Répétez les 3 mots.	20 secondes	/3
Pouvez-vous épeler le mot MONDE à l'envers : EDNOM.	30 secondes	/5
Pouvez-vous me dire quels étaient les 3 mots que je vous ai demandé de répéter et de retenir tout à l'heure ?	10 secondes	/3
Montrer un crayon. Quel est le nom de cet objet ?	10 secondes	/1
Montrer votre montre. Quel est le nom de cet objet?	10 secondes	/1
Écoutez bien et répétez après moi : "Pas de mais, de si, ni de et"	10 secondes	/1
Tendre au sujet une feuille de papier sur laquelle est écrit en gros caractères : "Fermez les yeux" et dire au sujet : Faites ce qui est écrit	10 secondes	/1
Tendre au sujet une feuille de papier et un stylo, en disant : Voulez-vous m'écrire une phrase, ce que vous voulez, mais une phrase entière. Cette phrase doit être écrite spontanément. Elle doit contenir un sujet, un verbe, et avoir un sens.	30 secondes	/1
Tendre au sujet une feuille de papier et lui demander : "Voulez-vous recopier ce dessin ?"	1 minute	/1
		
Poser une feuille de papier sur le bureau, la montrer au sujet en lui disant : Écoutez bien et faites ce que je vais vous dire : Prenez cette feuille de papier avec la main droite Pliez-la en deux Et jetez-la par terre	30 secondes	/1 /1 /1
Score Global		/30