

**Influence de l'entraînement à l'équilibre en simple tâche
sur la performance d'équilibre en simple et en double
tâche chez les jeunes adultes**

Travail de Master

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de
Master of Science en sciences du sport
Option enseignement

déposé par

Fabio Catano

à

l'Université de Fribourg, Suisse
Faculté des sciences et de médecine
Section Médecine
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent

Prof. Dr. Wolfgang Taube

Conseiller

Dr. Michael Wälchli

Estavayer-le-Lac, Novembre 2023

Résumé

Introduction. L'entraînement à l'équilibre est bénéfique pour améliorer le contrôle postural, prévenir les chutes et favoriser la réhabilitation. L'attention joue également un rôle essentiel dans la régulation de l'équilibre. L'ajout d'une deuxième tâche peut entraîner une interférence entre les tâches, avec un coût de la deuxième tâche variant tout au long de la vie. Jusqu'à aujourd'hui, seulement peu d'études se sont concentrées sur l'influence de l'entraînement d'équilibre sur la performance d'équilibre en double tâche chez les adultes en bonne santé. L'objectif de ce travail est d'observer s'il est possible d'améliorer une performance d'équilibre après un entraînement d'équilibre non-spécifique et si une deuxième tâche motrice ou cognitive interfère davantage sur la tâche motrice de base.

Méthode. Cette étude a été menée auprès de 30 jeunes adultes en bonne santé (15 femmes, 15 hommes) âgés de 26.5 ± 3.9 ans. Les participants ont été répartis de manière aléatoire en deux groupes : un groupe d'intervention (INT) et un groupe de contrôle (CONT), avec une répartition équitable des sexes dans chaque groupe. Le groupe INT a effectué six séances d'entraînement d'équilibre en simple tâche (ST) sur une plateforme instable sur une période de trois semaines, entre le pre-test et le post-test. Le groupe CONT n'a pas effectué d'entraînement d'équilibre pendant toute la durée de l'étude.

Résultats. Les résultats ont relevé une réduction significative de la vitesse angulaire pour le groupe INT en condition « Easy balance » ($p = 0.028$) et en condition « Hard balance » ($p = 0.048$). Dans les conditions de DT, le groupe CONT a présenté une amélioration significative en condition « Easy balance et cognitive » ($p < 0.001$), tandis que le groupe INT s'est amélioré en Hard balance + Cognitive ($p = 0.006$). Dans les deux groupes, les conditions de DT avec l'ajout d'une tâche motrice n'ont montré aucune évolution significative que ce soit au niveau « Easy » comme « Hard ». Aucune évolution significative n'a été observée dans les calculs des DTC, dans l'évolution du score lors des conditions de DT cognitives, ainsi que l'évolution du score lors des conditions de DT motrices.

Conclusion. L'entraînement en ST peut améliorer l'équilibre en ST, mais il peut ne pas être aussi efficace pour améliorer l'équilibre en DT. En ce qui concerne le coût de la double tâche, aucune évolution significative n'a été observée dans les conditions d'équilibre en DT. Des recherches futures devraient tenir compte des recommandations antérieures concernant le volume, la fréquence et le contenu de l'entraînement, ainsi que l'inclusion d'un groupe d'entraînement en ST spécifique à la tâche pour une meilleure compréhension des effets spécifiques de l'entraînement sur la performance d'équilibre en DT.

Table des matières

1	Contexte scientifique et situation initiale	4
1.1	L'équilibre	4
1.2	Double tâche et interférence	5
1.3	Evolution au long de la vie	7
1.4	Entraînement d'équilibre ST	9
1.5	Entraînement d'équilibre DT	11
1.6	Objectif et questions de recherche	14
2	Méthode	15
2.1	Participants	15
2.2	Design expérimental	16
2.3	Entraînements d'équilibre	18
2.4	Récolte de données	20
2.5	Analyse des données	21
3	Résultats	22
3.1	Equilibre tâche simple	22
3.2	Double tâche cognitive	24
3.3	Double tâche motrice	30
3.4	Résumé	36
4	Discussion	37
4.1	Influence de l'entraînement ST sur la performance d'équilibre ST	37
4.2	Influence de l'entraînement à l'équilibre ST lors des conditions d'équilibre DT ...	38
4.3	Evolution du coût de la double tâche après un entraînement à l'équilibre ST	40
4.4	Limites	42
5	Conclusion	43
6	Bibliographie	44
7	Annexes	48
8	Remerciements	52

1 Contexte scientifique et situation initiale

1.1 L'équilibre

Pollock et al. (2000) définissent l'équilibre comme l'action de maintenir, d'atteindre ou de rétablir un état d'équilibre pendant une posture ou une activité. Il est le résultat de l'interaction entre le système sensoriel (les yeux, l'oreille interne et les récepteurs sensoriels des pieds et des muscles), le système nerveux central et les muscles qui contrôlent la posture et les mouvements. L'équilibre est essentiel dans de nombreuses activités de la vie quotidienne, telles que la marche, la montée des escaliers, la pratique de sports ou même la simple station debout. Une revue systématique a conclu que l'entraînement à l'équilibre améliore le contrôle postural et neuromusculaire des jeunes adultes âgés de maximum 40 ans (Zech et al., 2010). Les auteurs faisaient toutefois remarquer qu'à cause de la faible qualité méthodologique et de la différence des entraînements des études analysées, les recherches doivent être poursuivies.

Au niveau neuronal, l'entraînement à l'équilibre entraîne des améliorations du contrôle postural chez les athlètes grâce à des mécanismes neuronaux qui impliquent à la fois les réseaux spinaux et supraspinaux (Taube et al., 2008). Au niveau spinal, on observe que cet entraînement réduit l'excitabilité des réflexes spinaux en raison d'une augmentation de l'inhibition présynaptique. Quant au niveau supraspinal, qui englobe le cortex moteur, l'entraînement à l'équilibre peut considérablement réduire l'excitabilité des régions corticospinale et corticale (Taube et al., 2007). Cette diminution de l'excitabilité corticale et des réflexes serait associée à des améliorations significatives des performances en matière d'équilibre.

Un bon entraînement à l'équilibre permet également de prévenir les chutes (Sherrington et al., 2008), qui peuvent entraîner des blessures graves (Verhagen et al., 2004), notamment chez les personnes âgées. L'étude de Gruber and Gollhofer (2004) démontre que l'entraînement sensorimoteur spécifique de l'équilibre entraîne une amélioration significative du taux de développement de la force (RFD) des muscles extenseurs de la jambe. Par conséquent, l'entraînement à l'équilibre peut avoir un effet bénéfique sur la force explosive ainsi que sur la stabilité articulaire. C'est pourquoi il est utile de maintenir un bon équilibre grâce à des entraînements tout au long de la vie. L'entraînement à l'équilibre a également montré ses bienfaits dans le domaine de la réhabilitation suite à différentes blessures des extrémités inférieures (Domínguez-Navarro et al., 2018). Cette étude systématique conclue que l'entraînement d'équilibre ainsi que les exercices de proprioception, ont un effet moyen à élevé sur la fonctionnalité des genoux après l'ajout d'une prothèse totale du genou.

D'un point de vue fonctionnel, l'attention joue un rôle essentiel dans la régulation de l'équilibre en nous permettant de traiter et de réagir à des informations sensorielles, qui fournissent constamment des informations sur notre position, notre orientation et nos mouvements.

1.2 Double tâche et interférence

Effectivement, nous sommes aujourd'hui confrontés à des demandes toujours plus grandes en termes de double tâche (DT), que ce soit dans notre vie professionnelle ou personnelle comme marcher en téléphonant ou encore dans le sport où les tâches simultanées peuvent être multiples. En général, ces situations sont gérées sans trop de difficulté car la tâche posturale (comme la marche) est automatisée, ce qui signifie qu'elle ne demande que peu de ressources attentionnelles. Cependant, l'ajout d'une deuxième tâche peut rendre la tâche simple (ST) motrice problématique (Ruffieux et al., 2015). En prenant la marche comme exemple, la variabilité des pas ainsi que la vitesse de marche va varier si une tâche concurrente cognitive (tels que des calculs mentaux) est effectuée simultanément (Krampe et al., 2011). La tâche cognitive interfère alors avec la tâche motrice simple. L'interférence entre les tâches se produit lorsque les ressources cognitives nécessaires pour exécuter une tâche sont partagées avec une autre tâche concurrente. Cela peut entraîner une réduction des performances dans l'une ou les deux tâches, car les ressources disponibles sont limitées (Lim et al., 2015). Li et al. (2001) ont observé que, lorsqu'une tâche cognitive et une tâche de marche sont combinées, les jeunes adultes accordent généralement la priorité à la tâche cognitive, tandis que les enfants et les personnes âgées accordent plutôt la priorité à la performance de la marche. Concernant l'ajout d'une deuxième tâche motrice, une étude a été menée auprès de 12 adultes en bonne santé (6 hommes et 6 femmes, âgés de 20 à 28 ans) afin d'étudier les effets de l'interférence cognitive et motrice sur les performances de marche et l'activation neuronale (Beurskens et al., 2016). Les participants ont été soumis à trois conditions : marche en tâche simple (ST), marche avec interférence cognitive (DT-CI) et marche avec interférence motrice (DT-MI). La tâche cognitive a été évaluée en mesurant le temps de réaction entre l'apparition d'un son grave et la réponse motrice appropriée (appui sur une boîte à boutons). Des temps de réaction plus courts indiquaient une meilleure performance dans cette tâche. Quant à la tâche motrice, la performance a été mesurée en enregistrant la durée totale de contact entre deux anneaux interconnectés. Un temps de contact total plus court entre les anneaux témoignait d'une meilleure performance dans cette tâche. Les résultats ont montré que la marche avec interférence cognitive et la marche avec interférence motrice entraînaient une diminution de la vitesse de marche et de la longueur de la foulée, une augmentation du temps de foulée et une augmentation de la variabilité tempo-spatiale par

rapport à la marche en tâche simple. Cependant, les effets étaient plus prononcés dans le DT-MI que dans le DT-CI.

Ward et al. (2021) ont également effectué une étude visant à comparer l'effet de l'ajout de diverses tâches cognitives à une tâche motrice d'équilibre sur une surface stable ou instable (en mousse), chez deux groupes distincts : un groupe de jeunes adultes âgés de 18 à 35 ans et un groupe de personnes âgées de 60 ans et plus. Parmi les tâches cognitives testées, figurait une tâche de type « 2-back », qui sera également utilisée dans la présente étude (voir la description détaillée dans le chapitre : 2.2.3 *Balance and cognitive*). Chaque participant a été soumis à cette tâche cognitive en équilibre sur une surface stable, puis à la même épreuves sur la surface instable. Les données concernant la posture des candidats ont été relevées grâce à des capteurs portables fixés sur le corps des participants et mesuraient le balancement postural. Il a également été demandé aux participants de remplir un questionnaire pour estimer la confiance en l'équilibre lors de la réalisation des exercices. Les résultats de l'étude ont révélé des différences significatives entre les groupes d'âge, c'est-à-dire que les jeunes adultes avaient une meilleure stabilité que les personnes âgées en équilibre avec une charge cognitive de type « 2-back ». Aucune évolution significative n'a cependant été relevée entre la surface stable et la surface en mousse avec ce type de charge cognitive.

Pour mesurer le niveau d'interférence lors d'une situation de DT, on parle généralement du coût de la deuxième tâche (DTC, dual-task cost en anglais). Ce coût se réfère à la diminution ou l'augmentation des performances dans une tâche donnée due à l'interférence de l'exécution d'une autre tâche en parallèle. Un DTC positif signifie qu'il y a une diminution des performances de la tâche principale lorsque la deuxième tâche est ajoutée. Par exemple, si une personne effectue une tâche de marche et simultanément une tâche cognitive comme résoudre des problèmes mathématiques, un DTC positif serait observé si la performance de marche se détériore lorsque la tâche mathématique est ajoutée. En revanche, un DTC négatif signifie qu'il y a une amélioration des performances de la tâche principale lorsqu'une deuxième tâche est ajoutée. Par exemple, si une personne effectue une tâche de marche et simultanément une tâche motrice comme lancer une balle en l'air, un DTC négatif serait observé si la performance de marche s'améliore lorsque la tâche motrice est ajoutée.

Dans une étude menée par Pavão et al. (2021), la performance d'équilibre associée à une tâche cognitive a été comparée entre des enfants et des jeunes adultes. Les participants devaient effectuer un compte à rebours par intervalles de 3 ou de 5 lors de la tâche cognitive, tandis que la surface d'équilibre (tâche motrice) variait entre les conditions : « standard », « standard sur mousse », « étroit », et « étroit sur mousse ». Les chercheurs ont calculé les DTC en se basant

sur la surface d'équilibre et la vitesse de déplacement du centre de pression des participants. Dans toutes les conditions cognitives, il a été observé que les participants présentaient des DTC moins élevés sur les surfaces étroites par rapport aux surfaces standard. Les auteurs ont observé que chez les enfants, plus que chez les adultes, la réalisation d'une double tâche nécessite des adaptations centrales qui augmentent la surface de déplacement du centre de pression. Des raisons mécaniques pourraient expliquer les coûts de double tâche moins élevés sur les bases étroites par rapport aux bases standard. Il est possible que des exigences cognitives élevées inciteraient les participants à accorder la priorité à la tâche motrice pour maintenir leur équilibre, ce qui se traduirait par une augmentation moins importante de la vitesse de déplacement du centre de pression pendant la réalisation d'une double tâche par rapport aux tâches cognitives plus simples.

Comprendre l'évolution de ce coût tout au long de la vie est également important pour appréhender l'évolution des mécanismes de la cognition et de la performance.

1.3 Evolution au long de la vie

1.3.1 Evolution de l'équilibre

Les études consacrées à l'évolution du contrôle postural au cours de la vie adoptent généralement une catégorisation des tranches d'âge, telles que « enfants », « jeunes », « adultes » et « personnes âgées ». Il est aujourd'hui connu que le développement du contrôle postural prend une forme de U inversé, avec des performances optimales chez les jeunes adultes, croissantes chez les enfants et décroissantes chez les personnes âgées (Riach & Hayes, 1987). Cependant, la délimitation des seuils d'âge varie d'une étude à l'autre. Par exemple, Prieto et al. (1996) ont distingué entre les jeunes adultes (âgés de 21 à 35 ans) et les personnes âgées (âgés de 66 à 70 ans), tandis que l'étude menée par Colledge et al. (1994) a adopté une approche distincte en subdivisant les participants en groupes selon des tranches d'âge différentes, à savoir les 20 à 40 ans, les 40 à 60 ans, les 60 à 70 ans, et les plus de 70 ans. Ainsi, il n'existe pas de catégories d'âge universellement similaires, chaque étude applique des divisions spécifiques en fonction de ses objectifs de recherche et de sa méthodologie. Marchesi et al. (2022) ont adopté une approche continue en considérant l'âge comme un facteur évolutif. Leur étude a impliqué la participation de 272 sujets âgés de 20 à 90 ans, soumis à des évaluations d'équilibre statique, tant les yeux ouverts que fermés, ainsi qu'à des épreuves d'équilibre dynamique sur une plateforme instable. Les déplacements médio-latéraux et antéro-postérieurs ont été mesurés pour chaque participant dans diverses conditions de contrôle postural. Les résultats dans la condition

dynamique sur une plateforme instable n'ont pas révélé de différences significatives. Cependant, une tendance exponentielle suggère l'accroissement de la variabilité médio-latérale et antéro-postérieure avec l'âge.

1.3.2 Evolution du DT

Chez les enfants, le DTC est généralement plus élevé que chez les adultes. Les enfants ont des capacités attentionnelles et exécutives moins développées, ce qui rend difficile pour eux de gérer efficacement plusieurs tâches en même temps (Duval et al., 2017). Ils sont donc plus sensibles à l'interférence entre les tâches et peuvent présenter des performances réduites lorsque confrontés à deux tâches simultanées.

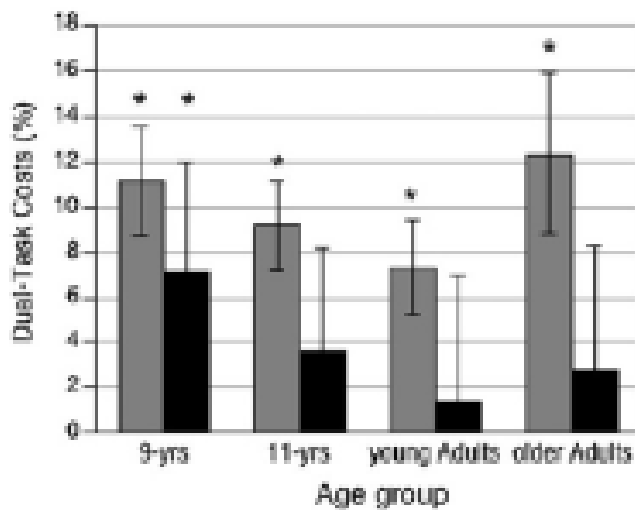
Les adultes auraient donc tendance à mieux gérer le double tâche que les enfants en raison du développement de leurs fonctions exécutives. Le DTC peut cependant varier en fonction de la complexité des tâches et de la demande attentionnelle requise (Abbruzzese et al., 2014). Ces auteurs ont montré que même si les enfants étaient sujets à plus d'interférence, les adultes sont aussi sujets à des interférences lors de tâches manuelles complexes ajoutées à la marche.

Chez les personnes âgées, le DTC a tendance à augmenter. Les raisons sont très probablement multifactorielles, notamment la coordination entre les processus moteurs et cognitifs. Cette coordination repose sur la fonction exécutive (la capacité de contrôler, de maintenir et d'orienter avec souplesse l'attention pour atteindre des objectifs), qui, par coïncidence, décline avec l'âge (Schaefer et al., 2008; Ward et al., 2021). Concernant la capacité d'entraîner le double tâche chez les personnes âgées, Tasvuran Horata et al. (2021) avaient pour objectif de comparer les effets de l'entraînement en ST et en DT sur la marche et les capacités cognitives chez les personnes âgées en bonne santé. L'entraînement en double tâche s'est avéré plus bénéfique que l'entraînement en tâche simple, montrant des améliorations significatives dans la vitesse de marche, la cadence et plusieurs paramètres cognitifs. Les auteurs soulignent cependant qu'il était important d'avoir un entraînement individualisé pour chaque participant.

Les études se penchant sur l'évolution du DTC tout au long de la vie remarquent donc généralement une courbe en U représentant le DTC (Krampe et al., 2011; Priest et al., 2008).

Figure 1

Evolution du coût de la deuxième tâche au long de la vie (Krampe et al. 2011).



Note. Le graphique représente l'évolution du coût de la deuxième tâche chez les jeunes de 9 et 11 ans, les jeunes adultes et les personnes âgées. Le graphique ci-dessus indique que l'évolution prend une forme de U au long de la vie.

1.4 Entraînement d'équilibre ST

Plusieurs travaux ont cherché à comprendre si l'entraînement à l'équilibre a des effets spécifiques uniquement dans la tâche entraînée ou si on peut améliorer d'autres compétences similaires (Donath et al., 2017; Kümmel et al., 2016). Une analyse systématique récente incluant 6 études respectant les critères d'éligibilité a voulu déterminer si l'entraînement d'équilibre était spécifique à la tâche entraînée chez les individus en bonne santé (Kümmel et al., 2016). Les résultats indiquaient l'absence d'effet de l'entraînement à l'équilibre sur les tâches d'équilibre non entraînées respectives. Par exemple, Giboin et al. (2015) ont entraîné 40 adultes en bonne santé répartis dans 2 groupes d'intervention avec des engins d'équilibre construits sur deux axes opposés : axe antéro-postérieur et axe transversal. Le groupe de contrôle ne s'entraînait pas. Après 2 semaines d'entraînement, chaque groupe a surpassé l'autre uniquement dans la tâche entraînée de manière significative. Les auteurs ont donc observé que l'entraînement à l'équilibre est très spécifique et que si l'on aimerait améliorer une capacité d'équilibre, il faut s'entraîner spécifiquement dans la tâche voulue. Ces travaux indiquent une progression spécifique dans l'équilibre pour des tâches d'équilibre simples mais ne s'appliquent pas pour un entraînement d'équilibre à double tâche.

L'entraînement à l'équilibre a fait donc ses preuves avec différents groupes d'intervention. Il est cependant nécessaire de se demander de quelle manière effectuer un entraînement d'équilibre efficace. La difficulté de l'entraînement joue un rôle très important dans l'apprentissage d'une tâche motrice. En effet, il est important de trouver le juste milieu dans le niveau de difficulté de la tâche. Famose (1990) explique dans son ouvrage « *Apprentissage moteur et difficulté de la tâche* » que si la difficulté est trop élevée, l'apprenant peut se sentir submergé, ce qui peut entraver sa progression. En revanche, si la difficulté est trop faible, l'apprentissage est peu stimulant et cela limite le potentiel d'amélioration. En ajustant progressivement la difficulté au fur et à mesure de l'apprentissage, Les connexions neuronales impliquées dans l'exécution de la tâche se renforcent progressivement. Cela signifie que les régions du cerveau responsables de la planification, de la coordination et de l'exécution motrice travaillent de manière plus efficace (Predel et al., 2020). Dans leur étude, Wälchli et al. (2018) ont utilisé un programme d'entraînement d'équilibre pour examiner les différences dans l'évolution du contrôle postural chez des enfants appartenant à trois groupes d'âge différents (6-7 ans, 11-12 ans, 14-15 ans), ainsi que les adaptations liées à l'entraînement telles que la hauteur de saut et la force explosive. Les résultats de l'étude ont conduit les auteurs à conclure que le contrôle postural peut être amélioré grâce à un entraînement spécifiquement conçu pour les enfants. Cependant, aucune amélioration n'a été observée dans les tâches posturales faciles en condition statiques ainsi que dans les tests dynamiques réalisées avec les deux jambes au sol. Les auteurs suggèrent que le niveau de difficulté des tâches utilisées dans leur étude était trop faible pour entraîner une amélioration significative. Ils appuient cette suggestion en se référant à une étude menée par Taube et al. (2010) où chercheurs ont mis en corrélation l'ampleur de l'adaptation à l'entraînement avec le niveau de difficulté de l'intervention avec des inline-skates chez des personnes âgées. La difficulté de la tâche jouant un rôle déterminant dans l'apprentissage de la tâche, le « timing » de l'entraînement est aussi très important (Thomas et al., 2016). Les auteurs ont mené des séances d'entraînement visant à consolider une tâche après son acquisition. Ils ont formé trois groupes d'intervention, en planifiant les séances d'entraînement à des moments différents après l'acquisition de la tâche (+20 minutes, +1 heure, +2 heures). Les résultats des tests de rétention 7 jours après ont révélé que les améliorations engendrées par l'entraînement diminuent à mesure que le laps de temps entre l'exercice et l'acquisition augmente.

Également chez des jeunes adultes en bonne santé, Egger et al. (2021) ont effectué des tests de rétention 24h après l'acquisition d'une nouvelle tâche d'équilibre. L'étude visait à déterminer si une nouvelle tâche d'équilibre pouvait être sensible à l'interférence lorsque des tâches d'équilibrage similaires sont apprises peu de temps après. La tâche d'équilibre A a été effectuée sur

la même plateforme d'équilibre qui sera utilisé dans ce travail. L'étude a utilisé un schéma d'intervention $A_1 - B - A_2$ qui affectait les participants à divers groupes d'intervention avec différentes conditions de tâche B. La tâche B était soit une tâche de force balistique non-posturale, soit une tâche de précision non-posturale ou alors une tâche posturale sur une « *wobble board* » (balance dans l'axe transversal). La tâche posturale A1 a été testée durant 6 séries de 8 essais d'une durée de 8 secondes. Le dernier groupe était le groupe de contrôle et n'a pas effectué de tâche B avant le test de rétention. Les résultats ont indiqué que la tâche d'équilibre est en effet sensible à l'interférence (ici négative), mais, uniquement lorsque la tâche B implique une tâche d'équilibre similaire. Cette constatation souligne la spécificité de l'entraînement dans les tâches d'équilibre. Il est à noter que les participants des groupes où la tâche différait de celle mesurée ont montré une amélioration significative lors du test de rétention. Outre l'interférence observée dans le test de rétention, il est important de noter l'amélioration significative dans chaque groupe d'intervention lors du pré-test, ce qui est remarquable pour notre étude. Entre le premier et le sixième essai du pré-test, il y a eu une amélioration notable. Cela suggère qu'un effet d'entraînement spécifique existe déjà pour tous les participants pendant le pré-test, qui ont passé au total 6 minutes et 24 secondes sur la plateforme d'équilibre durant les 6 séries.

1.5 Entraînement d'équilibre DT

Jusqu'à aujourd'hui, de nombreuses études ont examiné les effets de l'entraînement DT dans différents groupes d'âge pour la réhabilitation après certaines pathologies ou accidents mais principalement chez les personnes âgées. Cependant, peu d'attention a été accordée à l'effet de l'entraînement d'équilibre sur la double tâche chez les adultes en bonne santé. Lüder et al. (2018) ont cependant observé l'influence d'un entraînement d'équilibre en simple tâche en comparaison avec l'influence d'un entraînement d'équilibre en double tâche sur la capacité de double tâche chez les adolescents. Vingt-huit filles et garçons âgés de 12 à 13 ans ont été répartis dans 2 groupes d'intervention et ont suivi la moitié un entraînement d'équilibre en ST et l'autre moitié un entraînement en DT. Les entraînements duraient 15 minutes et se déroulaient lors de la phase d'échauffement des leçons d'éducation physique scolaire. Les résultats ont montré des améliorations significatives du DTC pendant la marche avec une tâche secondaire qui consistait à effectuer des calculs arithmétiques. Les auteurs ont conclu qu'il ne semblait pas y avoir de préférence pour l'entraînement en ST ou DT chez les adolescents sur la capacité de DT avec une tâche secondaire cognitive.

A l'opposé, d'autres études ont se sont également rapprochées du même design d'étude en observant les effets de différents entraînements ST ou DT sur les performances DT chez des

personnes âgées en bonne santé (Wollesen & Voelcker-Rehage, 2014). Selon les conclusions de cette analyse systématique, il est recommandé de privilégier les protocoles d'entraînement en DT plutôt qu'en ST afin d'optimiser les améliorations des performances cognitives et motrices. Parmi les études sélectionnées dans cette revue, seulement une étude a eu recours à un protocole d'entraînement comprenant des entraînements en ST pour améliorer les performances de DT chez les personnes âgées en bonne santé (Silsupadol et al., 2009). Les auteurs ont conclu que l'entraînement DT est une approche efficace pour améliorer la vitesse de marche chez les personnes âgées présentant des problèmes d'équilibre. En revanche, l'entraînement ST ne peut pas produire les mêmes résultats lorsqu'il s'agit de contrôler l'équilibre dans des situations de DT. Les enfants auraient donc tendance à améliorer leurs performances en DT avec deux méthodes d'entraînements (Lüder et al., 2018) tandis que les personnes âgées auraient cette possibilité uniquement avec un entraînement spécifique de DT (Silsupadol et al., 2009; Wollesen & Voelcker-Rehage, 2014). Pellecchia (2005) a observé l'impact de l'entraînement d'équilibre sur une tâche posturale motrice accompagnée d'une tâche cognitive chez des adultes en bonne santé. La tâche cognitive consistait à compter à rebours par 3 à partir d'un nombre à trois chiffres randomisé. Les 18 participants, âgés de 18 à 46 ans, ont été répartis en trois groupes : un groupe sans entraînement, un groupe s'entraînant exclusivement dans la tâche posturale, et un groupe s'entraînant en DT, combinant la tâche posturale avec la tâche cognitive. Les séances d'entraînement se sont déroulées sur trois sessions entre le pre- et le post-test. Les résultats ont démontré une amélioration, soit une réduction significative du balancement postural, uniquement chez le groupe ayant suivi les entraînements de DT et ce, spécifiquement en condition de DT. Ce groupe n'a pas présenté d'évolution significative dans la tâche posturale simple. Ces conclusions relèvent l'importance de l'entraînement spécifique en DT pour améliorer les performances dans cette modalité. Contrairement à d'autres résultats explorés dans des designs d'études semblables à celui-ci, le groupe d'entraînement ST ne s'est pas amélioré dans la tâche posturale simple.

L'étude de Kiss et al. (2018) s'est intéressée aux effets de l'entraînement en situation de ST et de DT sur l'apprentissage de l'équilibre dynamique chez les jeunes adultes en bonne santé. Les participants ont été répartis en trois groupes distincts en fonction du type d'entraînement qu'ils ont reçu. Deux groupes d'entraînements avaient une tâche motrice ou cognitive à entraîner. Pour la tâche motrice, les participants ont été entraînés à maintenir leur équilibre sur une plateforme instable. Pour la tâche cognitive, ils ont effectué des calculs arithmétiques (soustractions sérielles de trois) à haute voix. Le troisième groupe s'entraînait en DT avec la tâche motrice d'équilibre sur la plateforme instable et la tâche cognitive de calculs arithmétiques.

Les conclusions de cette étude ont mis en évidence que l'entraînement en DT conduit à des améliorations significatives à la fois dans la performance motrice, à savoir l'équilibre, et dans la performance cognitive, telle que les calculs arithmétiques, lors de situations de DT. En revanche, l'entraînement en ST montre des améliorations spécifiques dans la tâche entraînée, que ce soit la performance motrice ou la performance cognitive, sans entraîner des améliorations significatives dans l'autre domaine. Ces résultats rejoignent ceux de l'étude de Pellecchia (2005) pour l'entraînement DT, mais pas pour le groupe d'entraînement ST, qui lui s'est amélioré dans la tâche d'équilibre postural. Ces conclusions soulignent ainsi l'efficacité potentielle de l'entraînement en DT pour optimiser la performance dans des situations complexes de la vie quotidienne, où la coordination entre la motricité et la cognition est essentielle.

Des recherches futures devraient donc se concentrer une population de jeunes adultes en bonne santé afin d'approfondir notre compréhension de l'interaction entre l'équilibre et l'attention dans des conditions normales (c-à-d sans maladies ou blessures), ce qui pourrait avoir des implications importantes pour la promotion de la santé et le maintien de la mobilité tout au long de la vie adulte.

Ce type d'approche permettra d'évaluer l'influence de l'entraînement en ST sur les capacités d'équilibre lors de l'exécution simultanée d'une deuxième tâche cognitive ou motrice. Comprendre l'impact de l'entraînement en ST sur les performances en double tâche pourrait fournir des informations précieuses pour le développement de programmes d'entraînement plus efficaces visant à améliorer les compétences d'équilibre dans des contextes réels où des situations de DT sont souvent présentes. En explorant cette approche, notre étude cherche à apporter de nouvelles perspectives sur l'entraînement à l'équilibre et l'interaction entre l'équilibre et le double tâche.

1.6 Objectif et questions de recherche

L'objectif de ce travail est d'observer s'il est possible d'améliorer une performance d'équilibre après un entraînement d'équilibre non-spécifique et si une deuxième tâche motrice ou cognitive interfère davantage sur la tâche motrice de base.

Pour y répondre, nous nous sommes posé les questions suivantes :

- Un entraînement d'équilibre général en ST permet-il d'avoir des meilleures performances sur une tâche d'équilibre spécifique ?
- Un entraînement d'équilibre général en ST permet-il d'améliorer la performance d'équilibre lorsqu'une deuxième tâche motrice ou cognitive est ajoutée ?

Afin d'explorer ces questions de manière scientifique, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

H0 : L'entraînement d'équilibre général en ST n'améliore pas une tâche d'équilibre spécifique

H1 : L'entraînement d'équilibre général en ST a un effet positif sur l'amélioration d'une tâche d'équilibre spécifique

H0' : L'entraînement d'équilibre en ST n'améliore l'équilibre aucune des 3 conditions d'équilibre.

H1' : L'entraînement d'équilibre en ST améliore l'équilibre dans les 3 conditions d'équilibre.

2 Méthode

Ce travail a été effectué à l'aide d'une partie de l'échantillon participant à une plus grosse étude menée par l'Université de Fribourg. Au total, 44 sujets ont participé à l'étude répartis dans un groupe de contrôle et 2 groupes d'intervention. Le deuxième groupe d'intervention (n = 14) devait suivre un entraînement d'équilibre exclusivement en double-tâche (Voir chap. Design expérimental) avec Célestine Schreiber, étudiante de Master en sciences du sport et du mouvement à l'Université de Fribourg. Pour ce travail, les données de ce groupe ont été exclues et seront traitées dans son travail personnel. Des mesures neuro-physiologiques ont également été effectuées durant le pre- et post-test. Chaque test a débuté par la partie performance utilisée dans ce travail et s'est poursuivie avec les mesures neuro-physiologiques afin d'éviter au maximum les biais dans les résultats relatifs à la performance d'équilibre des participants.

La méthode suivante fait donc référence uniquement aux mesures effectuées avec le groupe contrôle et le groupe d'intervention ST.

2.1 Participants

Au total, 32 jeunes adultes ont participé à cette étude. 2 participantes ont été exclues durant le pre-test. L'un d'entre eux a mal réagi à la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) et une autre participante n'a montré aucune réponse lors de la mise en place de la bobine pour la TMS. Les données de performance de ces 2 participantes ont précédé l'installation de la TMS mais n'ont toutefois pas été prises en compte dans ce travail. Finalement, ce sont 30 jeunes adultes (femmes = 15 ; hommes = 15) âgés de 26.5 ± 3.9 qui ont été répartis dans un groupe d'intervention (INT, n = 15) en simple tâche et un groupe de contrôle (CONT, n = 15). Les participants ont été répartis aléatoirement dans les 2 groupes respectant une équité de sexe dans chacun des groupes.

Tableau 1

Caractéristiques anthropométriques des participants au moment du pre-test. Valeurs moyennes.

	INT (n = 15)	Control (N = 15)	Total (n = 30)
Genre [f/m]	6/9	8/7	15/15
Age [années]	28.4 ± 3.4	24.6 ± 3.5	26.5 ± 3.9
Poids [kg]	71.7 ± 12.8	70.3 ± 11.7	71 ± 12.1
Taille [cm]	177.3 ± 6.1	173.3 ± 8.2	175.3 ± 7.4
IMC [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]	22.6 ± 2.9	23.26 ± 2.4	22.9 ± 2.7

Le groupe INT devait effectuer 6 entraînements d'équilibre en ST durant une période de 3 semaines entre le pre-test et le post-test. Afin d'éviter les biais, il a également été demandé au groupe contrôle de ne pas effectuer d'entraînement d'équilibre pendant toute la durée de l'étude. Les participants étaient tous en bonne santé et respectaient les critères d'exclusion suivants: perturbations neurologiques ou motrices, maladies ou blessures cérébrales et/ou cardiovasculaires graves, grossesse, épilepsie, pacemaker, implants auditifs ou métal dans le corps. Les participants ont également signé une déclaration de consentement, ceci afin de pouvoir utiliser les outils de mesures lors des pre- et post-tests.

2.2 Design expérimental

Le déroulement du pre- et post-test était identique pour les 30 participants. Chacun a été soumis à 3 conditions d'équilibre sur une plateforme plate qui bouge d'avant en arrière (max +/- 20 deg.). Cette plateforme était équipée d'un goniomètre (MP20, Megatron Elektronik, Putzbrunn, Germany) pour récolter les données de performance. Des ressorts interchangeables avec une tension allant de 0.472 N/mm à 2.077 N/mm permettaient de modifier la difficulté de la tâche d'équilibre. Un niveau « facile » avec les ressorts de 2.077 N/mm était identique pour tous les participants tandis que le niveau difficile a été déterminé individuellement selon le niveau de base du participant. Ce niveau a été déterminé en changeant les ressorts dans un ordre régressif avant le test jusqu'à trouver une difficulté où le participant arrivait encore à tenir sur la plateforme mais avec difficulté. La plupart des participants ont effectué les conditions d'équilibre au niveau difficile avec des ressorts entre 0.472 N/mm et 0.656 N/mm. Les participants avaient le droit d'aller toucher en butée avec la plateforme lorsque le niveau était difficile. Sauf en cas de danger, il leur a été demandé de ne pas se tenir à la barrière de sécurité ou de descendre de la plateforme en faisant un pas afin de ne pas devoir répéter la prise de mesure de la condition d'équilibre en cours. Une fois les consignes transmises et les niveaux de difficulté déterminés, les tests pouvaient commencer.

2.2.1 Balance

La tâche d'équilibre simple consistait à tenir en équilibre sur la plateforme le plus horizontalement possible en tenant un plateau en bois dans les deux mains sans le lâcher. Les participants n'avaient pas d'autres consignes particulière et étaient libre de regarder où ils voulaient et d'adopter la position qu'ils voulaient durant la mesure.

2.2.2 Balance and motor

La double tâche motrice consistait à tenir un plateau en bois dans les mains et maintenir une bille le plus proche du centre tout en gardant l'équilibre. Le plateau avait des rebords (voir figure 2). La tâche motrice a été effectuée 2x au niveau facile et 2x au niveau difficile déterminé avec chaque participant.

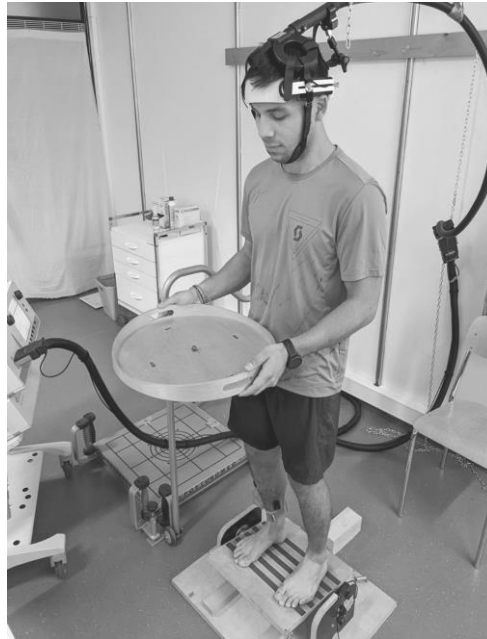
2.2.3 Balance and cognitive

La double tâche cognitive consistait à garder l'équilibre tout en effectuant un exercice de type « 2-back » qui consiste à faire défiler des chiffres de 1 à 9 sur un écran en face du participant. Si un chiffre se répète 2 positions après que le même chiffre ait été affiché, le candidat doit dire ce chiffre à haute voix (exemple : 5, 3, 7, 1, 7, 4, 9, ..). L'équilibre avec tâche cognitive a également été effectuée deux fois dans chaque niveau de difficulté.

Les différentes conditions d'équilibre ont été effectuées dans un ordre aléatoire par chacun des candidat. Les participants commençaient soit par les conditions faciles « Easy balance », « Easy balance + Motor », « Easy balance + Cognitive », dans un ordre aléatoire, suivies des conditions « Hard balance », « Hard balance + Motor », « Hard balance + Cognitive » également dans un ordre aléatoire ou alors en commençant par les conditions difficiles, puis par les conditions simple. Chaque condition était effectuée 2x durant 30 secondes. Après chaque essai, le participant pouvait descendre de la plateforme et effectuer une pause à sa guise qui durait environ 30 secondes. Durant ce temps, les résultats de la performance d'équilibre étaient montrés sous forme d'un graphique en courbe au participant.

Figure 2

Photo d'un participant sur la plateforme d'équilibre en double tâche.



Note. Représentation d'un participant sur la plateforme d'équilibre dans la condition « Easy balance + Motor ». Le participant porte sur lui un casque et un casque pour les stimulations transcrâniennes électromagnétique ainsi que des électrodes sur la jambe droite pour l'électromyographie pour des mesures qui ne sont pas utilisées dans ce travail.

2.3 Entraînements d'équilibre

Après le pre-test, le groupe INT a effectué 6 entraînements d'équilibre en simple-tâche sur différents types d'engins durant 3 semaines, soit 2 entraînements par semaine avant d'effectuer le post-test. La période d'entraînement était identique pour le groupe dual-task mais ceux-ci ont effectué uniquement des exercices variés d'équilibre en double-tâche. Les entraînements ont été donnés durant 3 semaines avec 3 à 5 participants à la fois pour enchaîner avec un nouveau groupe, ceci afin de respecter le passage au post-test la semaine suivant le dernier entraînement avec chaque participant. Les entraînements d'équilibre étaient effectués sur différents engins tels que : Slackline, Bosu-ball, divers appareils de la marque Pedalo, balance pad, Balance-board, etc. Chaque entraînement était accompagné par un expert afin de motiver les participants et de bien expliquer les exercices à effectuer. Le niveau de difficulté était si possible adapté pour chaque exercice afin d'optimiser un maximum l'apprentissage. La figure 3 présente le déroulement d'une séquence d'entraînement d'équilibre effectuée par les participants du groupe INT. Les sujets devaient effectuer 2 fois chaque poste en alternance avec un autre participant qui était présent et l'encourageait afin d'augmenter la motivation.

Figure 3

Déroulement d'une séquence d'entraînement d'équilibre en ST

Consigne

Entoure le niveau choisi et selon la maîtrise, passe au niveau suivant à la répétition suivante (si c'est vraiment trop facile) où à l'entraînement suivant.

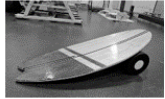


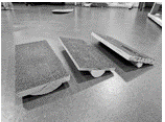

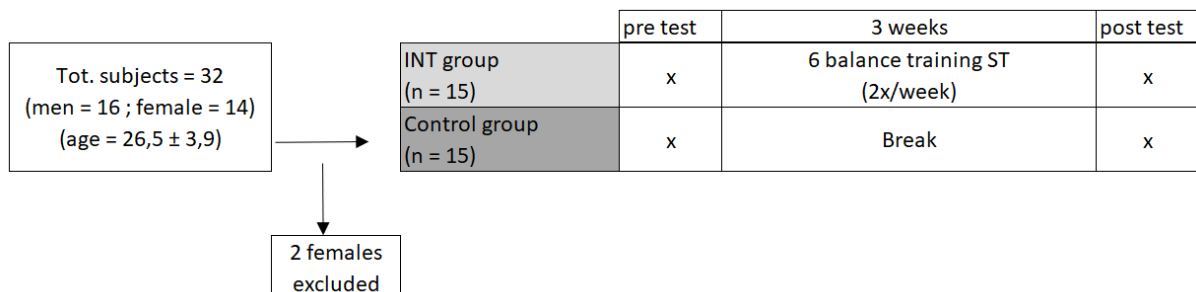
	Illustrations	Niveaux	Durée
Exercice 1		Niveau 1 : Standard, les pieds assez écartés Niveau 2 : Standard, les pieds plus serrés Niveau 3 : Poser un genou sur la planche Niveau 4 : Freestyle ! Laisse aller ton imagination. 180°, One foot, etc...	2x 2min
Exercice 2		Niveau 1 : Toucher sol à l'arrière avec un pied (alterner) Niveau 2 : Toucher sol à l'avant avec un pied (alterner) Niveau 3 : Equilibre sur une jambe les yeux fermés	2x 2min
Exercice 3		Niveau 1 : Marche en avant, demi-tour au bout Niveau 2 : Marche avant puis arrière Niveau 3 : Marche arrière avec 180 glissé au bout Niveau 4 : Freestyle !	2x 2min
Exercice 4		Niveau 1 : 2 min sur en restant le plus droit possible sur un engin. Changer de pied pour 2 ^{ème} série. Niveau 2 : Commencer les yeux ouverts et fermer les yeux quand trop facile	2x 2min
Exercice 5		Niveau 1 : Lever une jambe après l'autre, se stabiliser Niveau 2 : Les yeux fermés, lever une jambe après l'autre et se stabiliser	2x 2min

Figure 4

Design expérimental des phases de tests et entraînements



Note. La Figure 4 présente le design expérimental pour le groupe d'intervention ainsi que pour le groupe de contrôle. Le groupe INT a effectué 6 entraînements d'équilibre en ST durant 3 semaines et le groupe contrôle ne s'est pas entraîné durant 3 semaines entre le pre- et le post-test.

2.4 Récolte de données

Pour quantifier la performance de la tâche d'équilibre simple, un goniomètre (MP20, Megatron Elektronik, Putzbrunn, Germany) fixé sur l'axe central de la plateforme fournissait toutes les données de performance d'équilibre. Cet instrument a permis de mesurer la vitesse angulaire (Sway) ainsi que le variation de déplacement (en degrés) par rapport au zéro (correspondant à la position horizontale de la plateforme). Nous estimons que les données Sway indiqueront davantage la stabilité du participant que la déviation de l'axe central. En effet, il est possible d'avoir une position très stable en restant en dessous ou en dessus du zéro de l'axe transversal (déviation du centre = 0) de la plateforme. Durant la tâche motrice, le déplacement de la bille a d'abord été filmé par une caméra haute définition fixée au plafond au-dessus du participant. Les vidéos ont ensuite été traitées à l'aide d'un logiciel « Tracker Video Analysis and Modeling Tool (Version 6.1.2) » (Brown et al., 2023) pour analyser la vitesse de déplacement et la variation de position par rapport au centre du plateau. La tâche cognitive était évaluée par un expert présent à côté du participant. Durant le test « 2-back », les points étaient débités si le candidat disait un chiffre en trop ou alors manquait un chiffre. Pour chaque condition, une moyenne des performances entre les deux répétitions a été effectuée pour avoir un score moyen prenant en compte l'éventuel entraînement durant la tâche.

2.5 Analyse des données

L'analyse des données dans cette étude a été réalisée avec les données de vitesse angulaire (Sway) recueillies grâce au goniomètre installé sur la plateforme d'équilibre. Celles-ci ont été corrigées en éliminant les périodes où la plateforme touchait les extrémités ($Sway = 0$). Cela a permis d'obtenir des données plus représentatives de l'équilibre sur une surface instable. Ensuite, toutes les valeurs ont été entrées dans le logiciel « jamovi (Version 2.2.5) » (The jamovi project, 2023) pour effectuer des tests ANOVA à mesures répétées. Afin d'ajuster le niveau de signification correspondant à l'évolution entre le pre- et le post-test au sein de chaque groupe indépendamment, les valeurs « p » obtenues dans les tests post-hoc avec la méthode de Bonferroni ont été multipliées par 2. L'objectif était d'analyser l'effet de l'entraînement d'équilibre entre le pre-test et le post-test pour chaque groupe indépendant. Les coûts de la deuxième tâche ont d'abord été calculés dans un fichier Excel avant d'être intégrés dans Jamovi.

Nous avons évalué les variations de vitesse angulaire (Sway) dans toutes les conditions ST et DT entre le pre-test et le post-test. Pour assurer des mesures précises, nous avons corrigé la vitesse angulaire en soustrayant le temps pendant lequel les participants entraient en contact avec les extrémités de la plateforme d'équilibre (Sway_Filtered), lorsque la vitesse angulaire était égale à zéro. Par exemple, si un candidat effectuait une des conditions d'équilibre durant 30 secondes et touchait les extrémités de la plateforme durant 3 secondes, la moyenne de SWAY a été calculé sur le temps total moins le temps passé sans mouvement dans les extrémités, soit 27 secondes. Pour faciliter la lecture des résultats, les valeurs Sway_Filtered sont nommées Sway sachant qu'aucune valeur Sway non corrigée a été prise en compte dans le calcul des résultats. De plus, nous avons calculé les coûts de la deuxième tâche pour les quatre conditions d'équilibre en double tâche. Pour calculer le DTC, l'évolution en pourcent de la valeur SWAY dans une condition en double tâche a été calculée par rapport à la valeur SWAY obtenue dans la condition d'équilibre simple et au même niveau de difficulté pendant le même test :

$$\frac{(Sway_{DT} - Sway_{ST})}{Sway_{ST}}$$

Lorsqu'au moins un résultat d'un test ANOVA était significatif, les tests post-hoc ont permis de déterminer quel groupe a eu une évolution significative dans le temps, dans le groupe ou dans l'interaction temps*groupe.

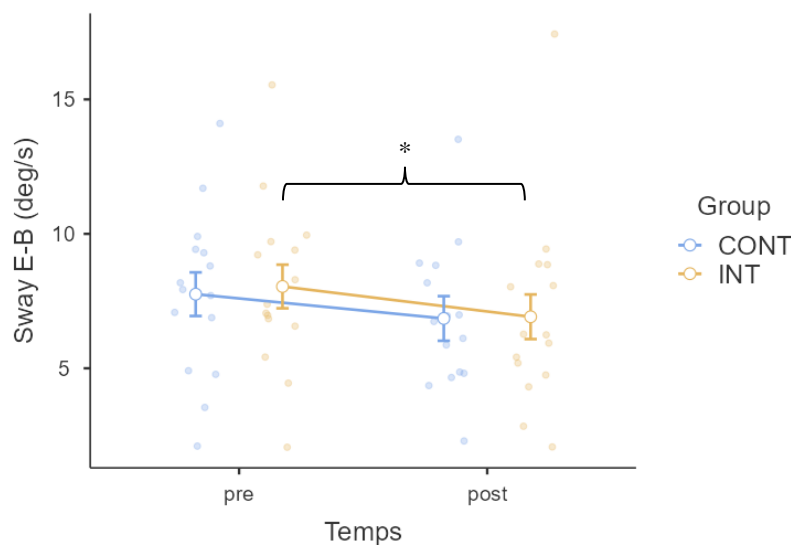
3 Résultats

Ce chapitre présente les résultats de notre étude qui examine les effets d'un entraînement d'équilibre en ST sur les performances d'équilibre en double tâche.

3.1 Equilibre tâche simple

Figure 5

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition : Easy balance

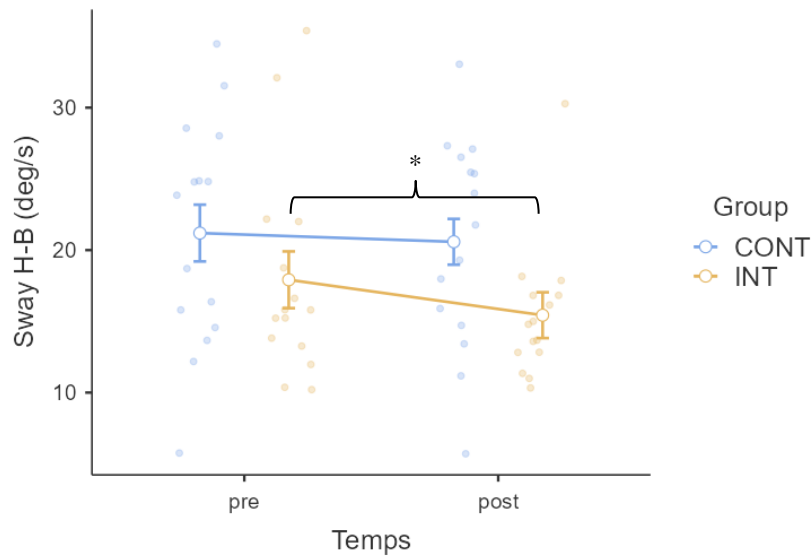


Note. Evolution de la Sway en deg/s dans la condition d'équilibre « Easy balance » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne. E-B = Easy balance.

Les résultats des tests ANOVA à mesures répétées de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test dans la condition « Easy balance » (Figure 5) sont significatifs pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 11.15$, $p = 0.020$, $\eta^2_G = 0.03$). Les tests post-hoc montrent que le groupe INT a une augmentation de 14% ($p = 0.028$) de la performance significative dans le facteur temps. Le groupe CONT a une tendance d'amélioration de 11.65% ($p = 0.09$) qui n'est pas significative (Tableau 2). Cependant, le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.02$, $p = 0.877$, $\eta^2_G = 0.00$) et l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.19$, $p = 0.717$, $\eta^2_G = 0.00$) ne montrent aucun résultats significatifs.

Figure 6

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition : Hard balance



Note. Evolution de la Sway en deg/s dans la condition d'équilibre « hard balance » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne. H-B = Hard balance.

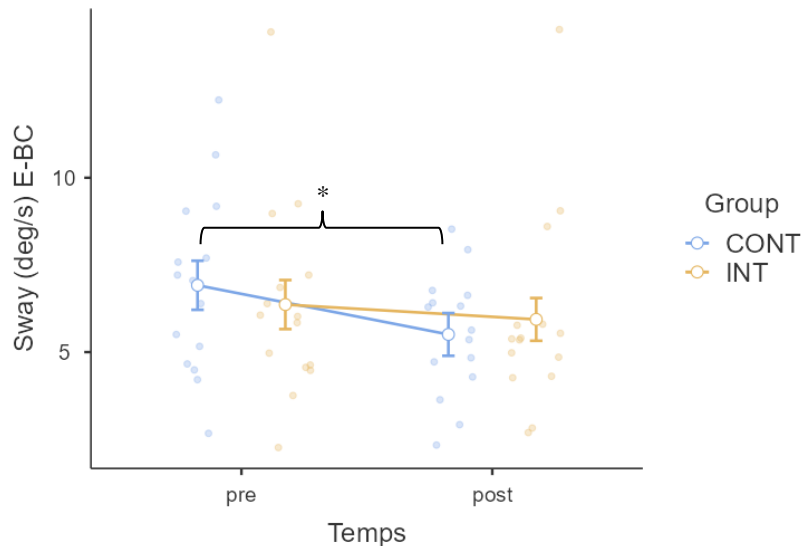
En ce qui concerne l'analyse de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test (Figure 6), les résultats de l'ANOVA à mesures répétées comprenant la progression en degrés par seconde pour chaque participant sont significatifs pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 4.46$, $p = 0.044$, $\eta^2_G = 0.01$). Les test post-hoc ont montré que le groupe INT a une amélioration de la performance significative ($p = 0.048$) entre le pre- et le post-test. Le groupe CONT ne marque aucune évolution significative dans le temps. Cependant, les résultats ne sont pas significatifs pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 2.95$, $p = 0.097$, $\eta^2_G = 0.09$) ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 1.63$, $p = 0.213$, $\eta^2_G = 0.00$).

3.2 Double tâche cognitive

3.2.1 Equilibre

Figure 7

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition : Easy balance + Cognitive

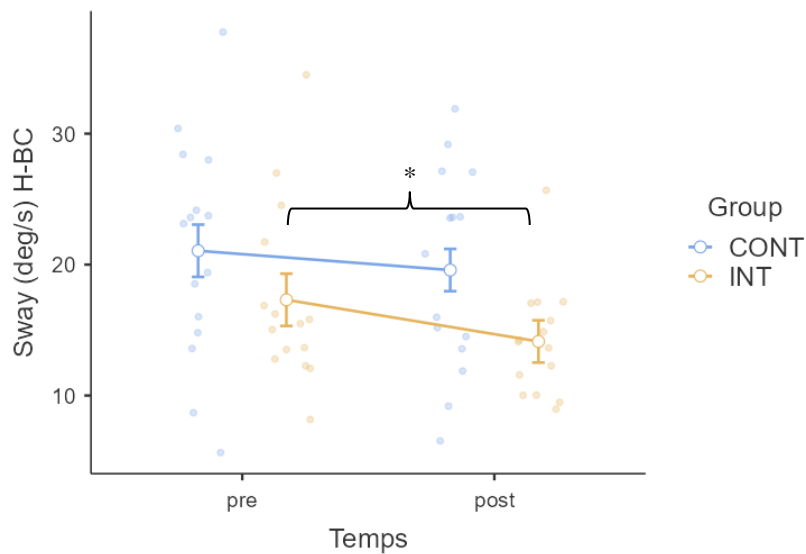


Note. . Evolution de la Sway en deg/s dans la condition d'équilibre « Easy balance + cognitive » entre le prétest et le posttest après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

En ce qui concerne l'analyse de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test (Figure 7), les résultats de l'ANOVA à mesures répétées comprenant la progression en degrés par seconde pour chaque participant sont significatifs pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 13.08$, $p = 0.001$, $\eta^2_G = 0.03$). Le groupe CONT a une meilleure performance (20.38%) que le groupe INT (6.68%)(voir tableau 2). Les post-hoc montrent que seul le groupe CONT a une amélioration significative ($p < 0.001$). Les résultats ne sont ni significatifs pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.00$, $p = 0.946$, $\eta^2_G = 0.00$) ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 3.76$, $p = 0.063$, $\eta^2_G = 0.01$).

Figure 8

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition : *Hard balance + Cognitive*



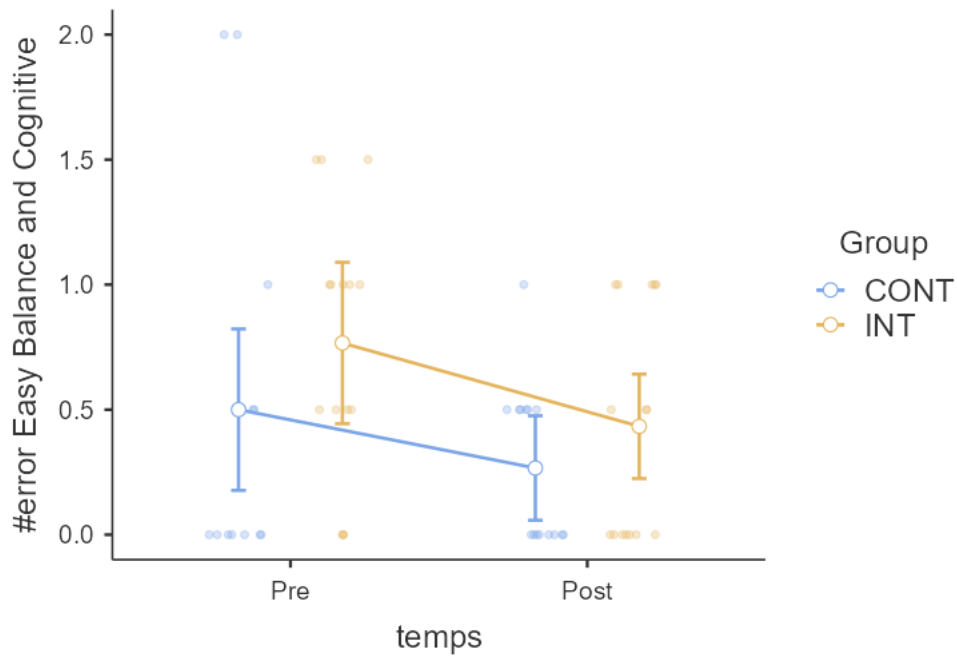
Note. Evolution de la Sway en deg/s dans la condition d'équilibre « Hard balance + cognitive » entre le pré-test et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

En ce qui concerne l'analyse de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test (Figure 8), les résultats de l'ANOVA à mesures répétées comprenant la progression en degrés par seconde pour chaque participant sont significatifs pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 11.25$, $p = 0.002$, $\eta^2_G = 0.03$). Le test post-hoc a montré une amélioration significative ($p = 0.006$) de la performance pour le groupe INT. Le groupe CONT n'a pas évolué de manière significative entre le pre- et le post-test. L'amélioration du groupe INT est de 18.37%. Cependant, les résultats ne sont pas significatifs pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 3.46$, $p = 0.073$, $\eta^2_G = 0.10$) ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 1.51$, $p = 0.229$, $\eta^2_G = 0.00$).

3.2.2 Deuxième tâche

Figure 9

Evolution du nombre d'erreur au test cognitive en condition : Easy balance + Cognitive

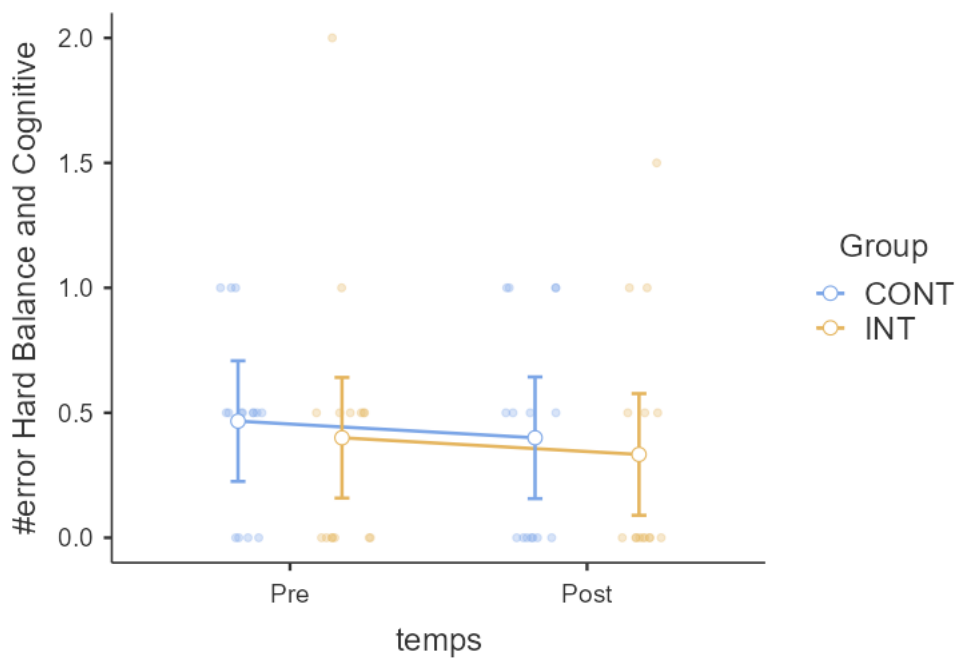


Note. Evolution du nombre d'erreur au test cognitive en condition « Easy balance + Cognitive » après 3 semaines d'entraînement entre le pretest et le post-test. L'axe vertical représente le nombre d'erreur moyen effectué lors du « 2-back test » dans la condition susmentionnée.

L'analyse nombre d'erreur lors de la double tâche cognitive en condition « Easy » entre le pre-test et le post-test (Figure 9) met en évidence une variation significative dans le facteur temps ($F_{1, 28} = 4.57$, $p = 0.041$, $\eta^2_G = 0.08$). Cependant aucune variation significative n'est observée dans le facteur groupe ($F_{1, 28} = 2.66$, $p = 0.114$, $\eta^2_G = 0.05$), ni dans l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.14$, $p = 0.709$, $\eta^2_G = 0.05$). Les tests post-hoc n'ont cependant pas révélé de valeur significative au sein des groupes INT ($p = 0.086$) et CONT ($p = 0.224$) avant correction de Bonferroni.

Figure 10

Evolution du nombre d'erreur au test cognitive en condition : Hard balance + Cognitive



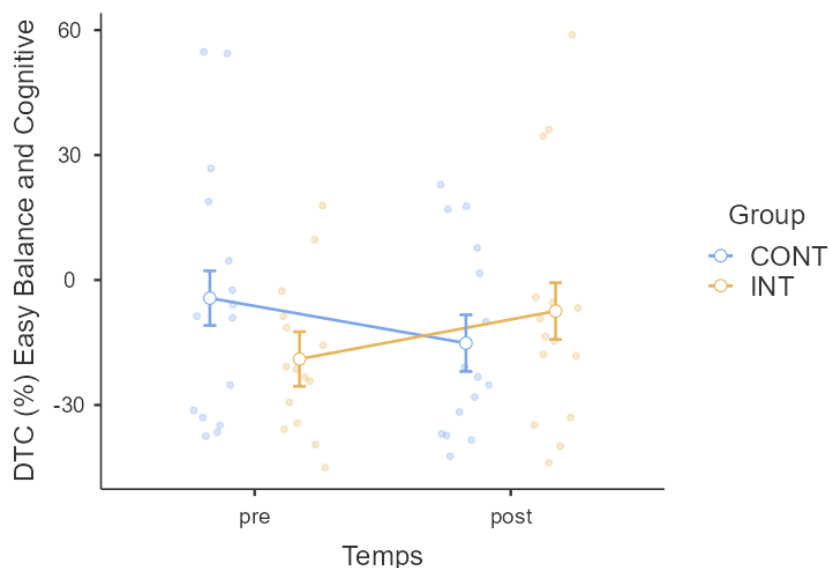
Note. Evolution du nombre d'erreur au test cognitive en condition « Hard balance + Cognitive » après 3 semaines d'entraînement entre le pre-test et le post-test. L'axe vertical représente le nombre d'erreur moyen effectué lors du « 2-back test » dans la condition susmentionnée.

L'analyse nombre d'erreur lors de la double tâche cognitive en condition « Hard » entre le pre-test et le post-test (Figure 10) ne démontre pas de significativité statistique selon l'ANOVA à mesures répétées. Aucune variation significative n'est observée dans le facteur temps ($F_{1, 28} = 0.47$, $p = 0.497$, $\eta^2_G = 0.01$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.24$, $p = 0.629$, $\eta^2_G = 0.01$) et l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.00$, $p = 1.000$, $\eta^2_G = 0.00$). les deux courbes négatives indiquent une tendance d'amélioration pour les deux groupes non significative. Le groupe CONT s'est amélioré de 14.29% et le groupe INT de 16.67% entre le pre-test et le post-test.

3.2.3 Dual-task costs

Figure 11

Evolution du dual-task cost (DTC) en condition : Easy balance + Cognitive

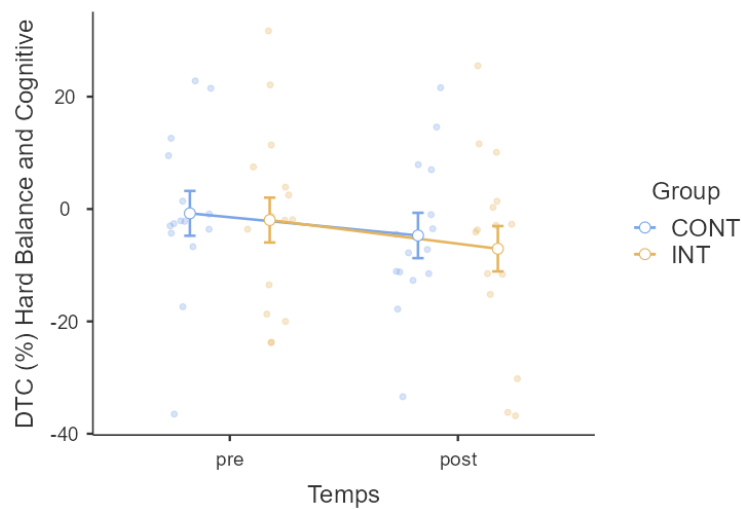


Note. Evolution en pourcentage du coût de la deuxième tâche (DTC) dans la condition d'équilibre « Easy balance + cognitive » entre le pré-test et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

Les résultats de l'analyse du dual-task cost (DTC) entre le pre-test et le post-test (Figure 11) ne présentent pas de valeurs significatives pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 0.00$, $p = 0.945$, $\eta^2_G = 0.000$), ni pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.190$, $p = 0.665$, $\eta^2_G = 0.00$). Selon l'ANOVA à mesures répétées. Une interaction significative est notable concernant l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 4.66$, $p = 0.040$, $\eta^2_G = 0.05$). Le groupe CONT s'améliore au post-test tandis que le groupe INT a un DTC plus élevé au post-test.

Figure 12

Evolution du dual-task cost (DTC) en condition : Hard balance + Cognitive



Note. Evolution en pourcentage du coût de la deuxième tâche (DTC) dans la condition d'équilibre « Hard balance + cognitive » entre le pré-test et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

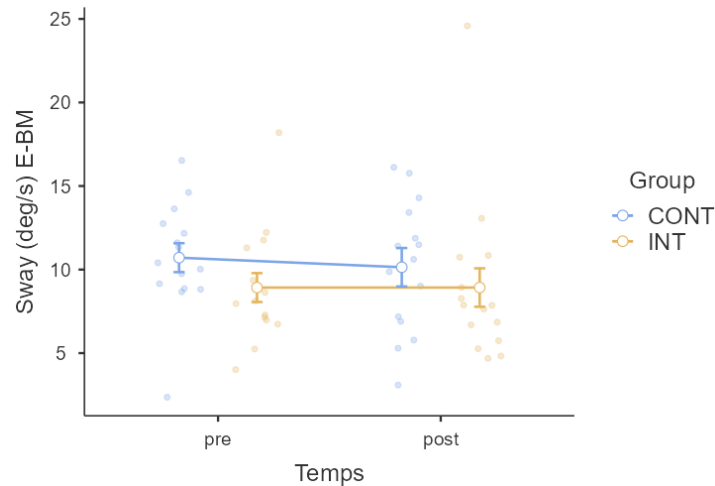
L'analyse du dual-task cost (DTC) entre le pre-test et le post-test (Figure 12) ne démontre pas de significativité statistique selon l'ANOVA à mesures répétées. Aucune variation significative n'est observée pour la progression en pourcentage entre les deux tests en ce qui concerne le facteur temps ($F_{1, 28} = 1.78$, $p = 0.193$, $\eta^2_G = 0.02$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.150$, $p = 0.699$, $\eta^2_G = 0.00$) ou l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.03$, $p = 0.865$, $\eta^2_G = 0.00$).

3.3 Double tâche motrice

3.3.1 Equilibre

Figure 13

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition: Easy balance + Motor

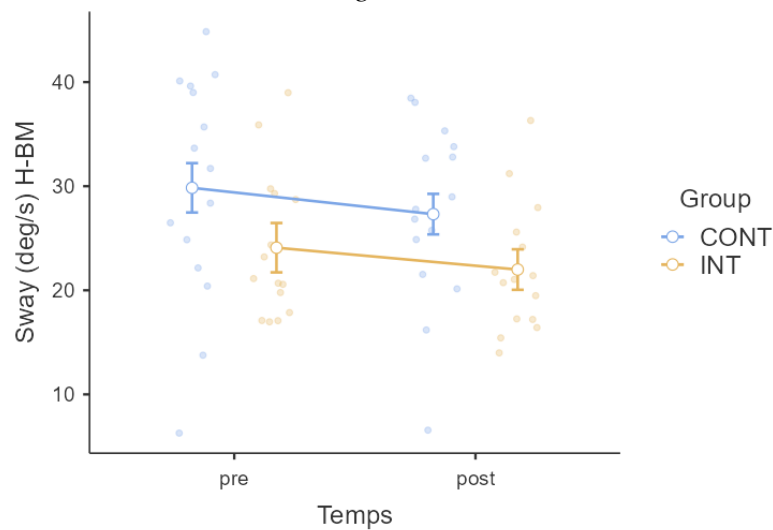


Note. . Evolution de la Sway moyenne en deg/s dans la condition d'équilibre « Easy balance + motor » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

En ce qui concerne l'analyse de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test (Figure 13), les résultats de l'ANOVA à mesures répétées comprenant la progression en degrés par seconde pour chaque participant sont significatifs ni pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 0.40$, $p = 0.534$, $\eta^2_G = 0.00$), ni pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 1.21$, $p = 0.281$, $\eta^2_G = 0.04$), et ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.40$, $p = 0.532$, $\eta^2_G = 0.00$).

Figure 14

Influence de l'entraînement sur la vitesse angulaire en condition: Hard balance + Motor



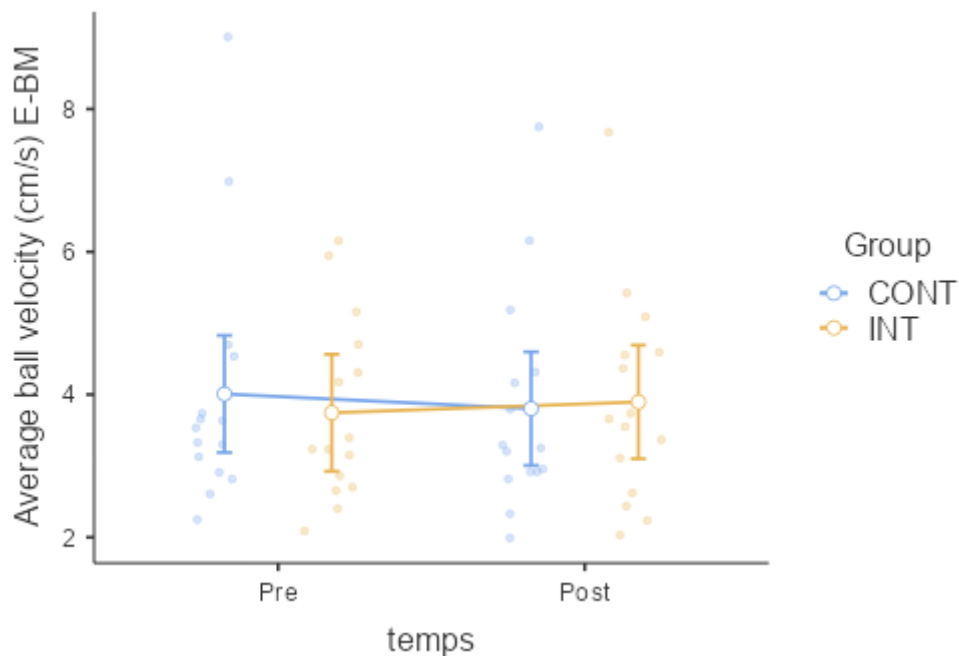
Note. Evolution de la Sway en deg/s dans la condition d'équilibre « Hard balance + motor » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

Concernant l'analyse de l'évolution de la vitesse angulaire (Sway) entre le pre-test et le post-test (Figure 14), les résultats de l'ANOVA à mesures répétées comprenant la progression en degrés par seconde pour chaque participant sont significatifs pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 7.44$, $p = 0.011$, $\eta^2_G = 0.02$). le groupe INT (-8.71%) et CONT (-8.47%) ont une tendance d'amélioration avec une courbe négative dans le temps mais aucune n'est significative après la correction 2x de Bonferroni. Les résultats ne sont pas significatifs pour le facteur groupe ($F_{1, 28} = 3.53$, $p = 0.071$, $\eta^2_G = 0.10$) ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.06$, $p = 0.803$, $\eta^2_G = 0.00$).

3.3.2 Deuxième tâche

Figure 15

Evolution de la vitesse de déplacement de la bille en condition : *Easy balance + Motor*

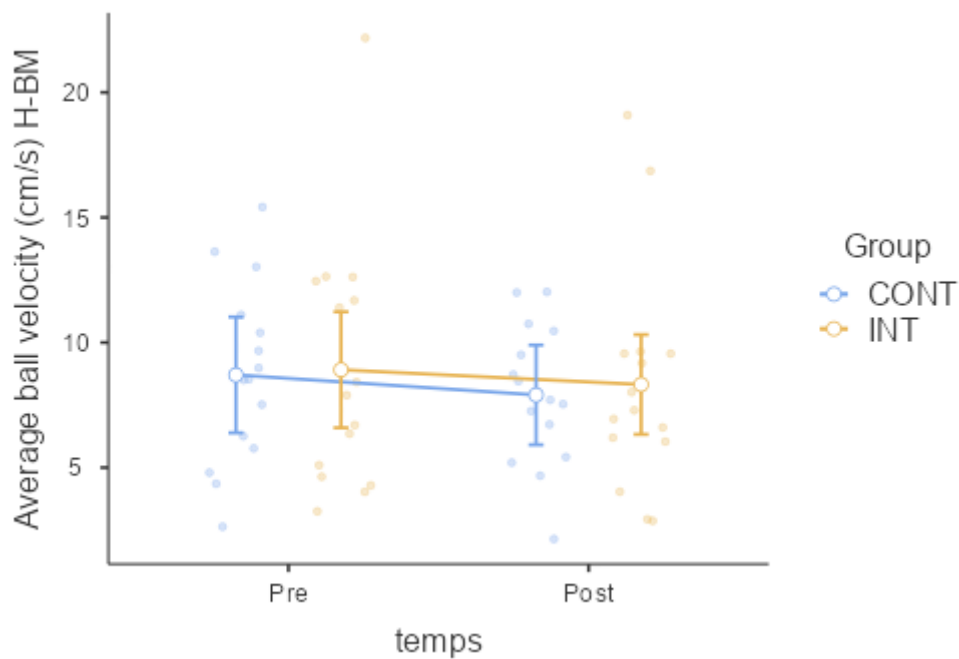


Note. Evolution de la vitesse de déplacement de la bille en centimètres par seconde en condition « Easy balance + Motor » après 3 semaines d'entraînement entre le pretest et le post-test. L'axe vertical représente la vitesse moyenne de déplacement de la bille sur le plateau dans la condition susmentionnée.

L'analyse de la vitesse moyenne de déplacement de la bille lors de la double tâche motrice en condition « Easy » entre le pre-test et le post-test (Figure 15) ne montre aucune évolution significative selon l'ANOVA à mesures répétées. Les facteurs temps ($F_{1, 28} = 0.01$, $p = 0.906$, $\eta^2_G = 0.00$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.03$, $p = 0.868$, $\eta^2_G = 0.00$) et le facteur temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.63$, $p = 0.435$, $\eta^2_G = 0.00$) ont tous des seuils de significativité où $p > 0.05$.

Figure 16

Evolution de la vitesse de déplacement de la bille en condition : Hard balance + Motor



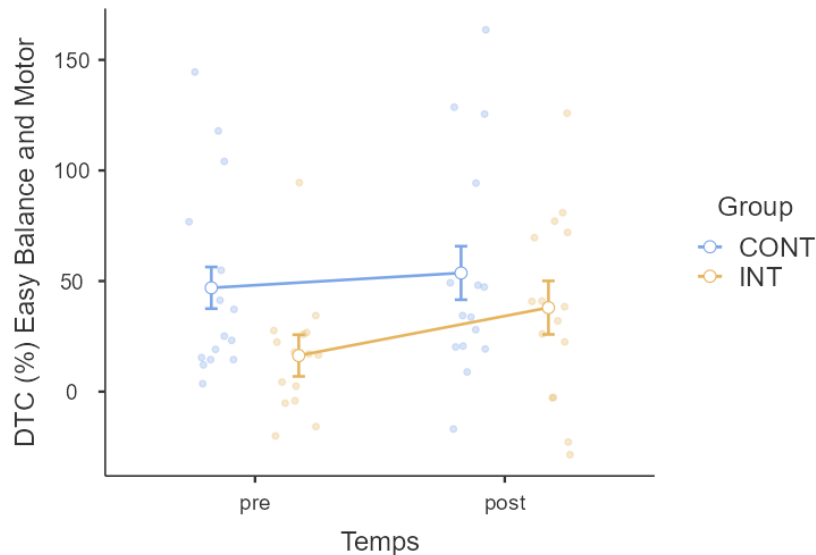
Note. Evolution de la vitesse de déplacement de la bille en centimètres par seconde en condition « Hard balance + Motor » après 3 semaines d'entraînement entre le pre-test et le post-test. L'axe vertical représente la vitesse moyenne de déplacement de la bille sur le plateau dans la condition susmentionnée.

Comme pour les résultats en condition « Easy », l'analyse de la vitesse moyenne de déplacement de la bille lors de la double tâche motrice en condition « Hard » entre le pre-test et le post-test (Figure 16) ne montre aucune évolution significative selon l'ANOVA à mesures répétées. Les facteurs temps ($F_{1, 28} = 1.64$, $p = 0.211$, $\eta^2_G = 0.01$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.05$, $p = 0.825$, $\eta^2_G = 0.00$) et le facteur temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.04$, $p = 0.846$, $\eta^2_G = 0.00$) ont tous des seuils de significativité où $p > 0.05$.

3.3.3 Dual-task costs

Figure 17

Evolution du dual-task cost DTC (%) en condition: Easy balance + Motor

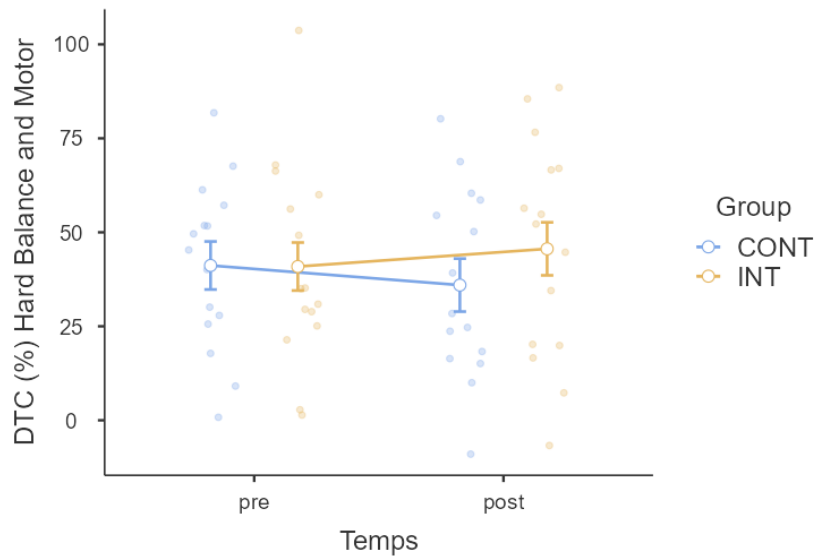


Note. Evolution en pourcentage du coût de la deuxième tâche (DTC) dans la condition d'équilibre « Easy balance + motor » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

Les résultats de l'analyse du dual-task cost (DTC) entre le pre-test et le post-test (Figure 17) ne présentent pas de significativité statistique selon l'ANOVA à mesures répétées. La progression en pourcentage entre les deux tests n'est pas significative pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 3.33$, $p = 0.079$, $\eta^2_G = 0.03$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 3.07$, $p = 0.091$, $\eta^2_G = 0.08$), ni pour l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.92$, $p = 0.345$, $\eta^2_G = 0.01$).

Figure 18

Evolution du dual-task cost (DTC) en condition: Hard balance + Motor



Note. Evolution en pourcentage du coût de la deuxième tâche (DTC) dans la condition d'équilibre « Hard balance + Motor » entre le prétest et le post-test après 3 semaines d'entraînement chez le groupe d'intervention (INT) et le groupe de contrôle (CONT). * $p < 0.05$. Les points représentent l'erreur standard de la valeur moyenne.

L'analyse du dual-task cost (DTC) entre le pre-test et le post-test (Figure 18) ne révèle pas de significativité statistique selon l'ANOVA à mesures répétées. Aucune variation significative n'est observée pour la progression en pourcentage entre les deux tests, que ce soit pour le facteur temps ($F_{1, 28} = 0.00$, $p = 0.964$, $\eta^2_G = 0.00$), le facteur groupe ($F_{1, 28} = 0.370$, $p = 0.548$, $\eta^2_G = 0.01$) ou l'interaction temps*groupe ($F_{1, 28} = 0.780$, $p = 0.383$, $\eta^2_G = 0.01$).

3.4 Résumé

Tableau 2

Mesures des résultats (ANOVA à mesures répétées sur le temps)

	INT			CONT			p-value		
	pre	post	diff. (%)	pre	post	diff. (%)	Time	Group	Time × groupe
Sway E-B (deg/s)	8.04	6.92	-14.00*	7.76	6.85	-11.65	0.002	0.877	0.717
Sway H-B (deg/s)	17.92	15.43	-13.87*	21.20	20.58	-2.89	0.044	0.097	0.213
Sway E-BM (deg/s)	8.92	8.92	0.01	10.71	10.14	-5.34	0.534	0.281	0.532
Sway E-BC (deg/s)	6.36	5.94	-6.68	6.92	5.51	-20.38*	0.001	0.946	0.063
Sway H-BM (deg/s)	24.09	21.99	-8.71	29.84	27.32	-8.47	0.011	0.071	0.803
Sway H-BC (deg/s)	17.31	14.13	-18.37*	21.06	19.58	-6.99	0.002	0.073	0.229
DTC E-BM (%)	16.32	37.97	21.65	46.95	53.66	6.70	0.079	0.091	0.345
DTC E-BC (%)	-18.98	-7.46	11.52	-4.34	-15.15	-10.81	0.945	0.665	0.040
DTC H-BM (%)	40.90	45.61	4.70	41.18	35.97	-5.21	0.964	0.548	0.383
DTC H-BC (%)	-1.95	-7.08	-5.13	-0.76	-4.70	-3.94	0.193	0.699	0.865
2-back E-BC (# errors)	0.8	0.4	-43.48	0.5	0.3	-46.67	0.041	0.114	0.709
2-back H-BC (# errors)	0.4	0.3	-16.67	0.5	0.4	-14.29	0.497	0.629	1.000
Ball velocity E-BM (cm/s)	3.744	3.896	4.056	4.008	3.803	-6.605	0.906	0.868	0.435
Ball velocity H-BM (cm/s)	8.910	8.321	-5.124	8.707	7.906	-9.201	0.211	0.825	0.846

Note. Le Tableau 2 réunit les résultats de tous les tests ANOVA à mesures répétées effectués pour cette étude et met en évidence l'évolution en % de chacun des groupes. Les p-values des 3 facteurs (temps, groupe et temps*groupe) analysés dans les ANOVA à mesures répétées sont indiqués et les valeurs significative (p<0.05) sont affichées en gras. Les résultats des tests post-hoc pour les conditions où une valeur significative a été observés sont décrit dans les Figures 5-18. * = Amélioration significative entre le pre- et le post-test (corrige 2x pour les tests des deux groupes).

4 Discussion

4.1 Influence de l'entraînement ST sur la performance d'équilibre ST

Conformément à nos attentes, nous avons observé des améliorations significatives de l'équilibre en ST dans les conditions « Easy balance » ($p=0.014$; -14.00%) et « Hard Balance » ($p=0.024$; -13.87%) pour le groupe d'intervention après 3 semaines d'entraînement d'équilibre en ST. Les entraînements d'équilibre généraux semblent donc avoir eu un effet positif sur la performance d'équilibre en ST pour le groupe d'intervention. Kümmel et al. (2016) avaient conclu dans leur revue systématique que l'entraînement à l'équilibre était efficace seulement si le contenu était spécifique à la tâche mesurée. Nos résultats, bien que positifs, semblent être en contradiction avec cette conclusion. Dans notre étude, nous avons utilisé une variété d'engins d'équilibre durant les entraînements pour solliciter différentes capacités d'équilibre. Il est possible que cette diversité ait contribué à l'amélioration de la performance d'équilibre, même si le contenu de l'entraînement n'était pas spécifique à la tâche mesurée.

Il est important de prendre en compte d'autres facteurs qui pourraient expliquer ces résultats contradictoires. Des éléments, tels que la fréquence, la durée et l'intensité de l'entraînement, ainsi que les caractéristiques individuelles des participants, pourraient également influencer les effets observés (Lesinski et al., 2015). Ces éventuels facteurs contradictoires sont détaillés dans le chapitre « 4.4 Limites » (ci-dessous).

Il est intéressant de noter que le groupe CONT, qui n'a pas bénéficié d'entraînements d'équilibre, a également montré une tendance d'amélioration de la performance dans la condition « Easy balance » ($p=0.090$; -11.65%), après correction 2x de Bonferroni. L'évolution du groupe CONT dans cette condition aurait également été significatif si nous n'avions pas procédé à une correction 2x de Bonferroni. Cette progression varie seulement très peu de celle du groupe d'intervention. Une explication possible de ce phénomène pourrait être liée à la procédure expérimentale. En effet, après les mesures de performance, tous les participants ont passé environ 45 minutes supplémentaires sur la plateforme d'équilibre pour la collecte des données neurophysiologiques. Cette durée prolongée sur la plateforme pourrait avoir un effet d'entraînement spécifique pour l'équilibre (Egger et al., 2021; Kümmel et al., 2016), ce qui expliquerait l'augmentation des performances observées dans le groupe CONT. Il est donc également possible que la progression constatée chez le groupe d'intervention ne soit pas due à l'effet de l'entraînement d'équilibre mais à l'entraînement spécifique à la tâche induit par la suite du protocole expérimental (développement dans le chapitre « 4.4 Limites »). Nous rappelons également qu'il

a été demandé aux participants du groupe CONT de ne pas changer leurs habitudes en effectuant des exercices d'équilibre durant la durée de l'étude.

4.2 Influence de l'entraînement à l'équilibre ST lors des conditions d'équilibre DT

Les résultats ont montré une évolution significative du Sway pour le facteur temps dans trois des quatre conditions d'équilibre en DT soit, « Easy balance + Cognitive », « Hard balance + Motor » et « Hard balance + Cognitive ». Contrairement à nos attentes, une diminution significative de la vitesse angulaire de 20,38% a été observée uniquement dans le groupe CONT ($p < 0,001$) pour la condition « Easy balance + Cognitive », tandis que le groupe INT a montré une légère tendance à l'amélioration qui n'était pas significative ($p = 0,492$). Ces résultats sont en accord avec les études antérieures menées par Wollesen and Voelcker-Rehage (2014) et Silsupadol et al. (2009), qui ont également constaté que l'entraînement d'équilibre en ST n'était pas efficace pour améliorer les performances d'équilibre en double tâche chez les jeunes adultes en bonne santé. Pellicchia (2005) avait également conclu que pour obtenir de meilleures performances en condition de DT, il faut s'entraîner un DT. L'auteur avait aussi observé que la performance d'équilibre en ST n'était pas améliorée grâce à un entraînement d'équilibre en condition de DT. Il est possible que les participants aient priorisé différemment les tâches après l'entraînement d'équilibre. En admettant que la tâche d'équilibre leur ait demandé moins d'attention, ils se seraient davantage concentrés sur la tâche cognitive. Toutefois, les résultats de la tâche cognitive en condition « Easy balance + Cognitive » montrent que les deux groupes ont amélioré leur performance au « 2-back test » de presque 50% (voir Figure 9). L'hypothèse que le groupe INT ait priorisé la tâche cognitive n'est donc pas favorable. Les DTC entre le pre- et le post-test ont seulement très peu évolué sans différence significative chez les deux groupes, ce qui suggère que le rapport entre l'équilibre et la tâche cognitive est resté identique.

Il est également intéressant de noter que nos résultats mettent en évidence une possible évolution des effets de l'entraînement en fonction de l'âge. Les études précédentes ont montré que l'entraînement en ST pouvait avoir une influence positive sur les performances en DT chez les enfants (Lüder et al., 2018), tandis que notre étude avec des adultes en bonne santé et d'autres études avec des personnes âgées ont montré des résultats mitigés. Cela suggère que les réponses à l'entraînement peuvent varier en fonction de l'âge et des capacités spécifiques des populations étudiées.

Cependant, une considération importante à prendre en compte est la pertinence des résultats dans les conditions « Easy » pour évaluer l'effet de l'entraînement. Il est possible que la tâche d'équilibre dans ces conditions soit si facile qu'elle ne requiert aucune attention particulière de

la part des participants. Effectivement, les mesures de Sway sont très faibles dans les conditions « Easy », ce qui pourrait ne pas apporter des résultats pertinents pour notre étude. Famose (1990) décrit dans son ouvrage intitulé « *Apprentissage moteur et difficulté de la tâche* » l'importance de la « *difficulté optimale* » pour l'apprentissage d'une tâche motrice. Selon lui, doser la difficulté dans l'apprentissage moteur implique d'ajuster le niveau de difficulté de la tâche en fonction des capacités des sujets. Il est essentiel de proposer des tâches légèrement supérieures à leurs compétences actuelles, mais qui restent réalisables, ce qui a été pris en compte lorsque nous avons déterminé le niveau « Hard » pour chaque participant de cette étude. Cette approche permet de favoriser l'acquisition des habiletés motrices des apprenants. Il est donc important d'exercer une certaine prudence dans l'interprétation des résultats dans ces conditions et de considérer qu'ils pourraient ne pas être représentatifs de l'effet réel de l'entraînement.

Les résultats des deux conditions d'équilibre en DT au niveau « Hard » suggèrent que le groupe INT a connu une amélioration de la performance d'équilibre lors de la condition DT avec la tâche cognitive. Cependant dans la condition « Hard balance + Motor », l'évolution du groupe INT n'est significative que si les valeurs ne sont pas corrigées 2x. Une tendance d'amélioration est tout de même observable chez les deux groupes. Sur ces bases, nous pouvons donc observer que le groupe INT a une tendance d'amélioration dans toutes les conditions sauf en condition « Easy balance + Motor ». Cela suggère que le niveau de difficulté d'équilibre aurait un impact sur les progrès après un entraînement d'équilibre de 3 semaines. En ce qui concerne l'évolution du score de la deuxième tâche motrice, aucune évolution significative n'a été notée. Nous ne pouvons donc pas conclure que l'entraînement a un effet sur la deuxième tâche mais uniquement sur l'équilibre dans certaines conditions.

La raison pour laquelle le groupe CONT a montré une meilleure performance dans la condition « Easy balance + cognitive » est difficile à déterminer. Il est possible que le groupe d'intervention se soit senti plus à l'aise sur la plateforme d'équilibre et qu'il ait accordé moins d'attention à la tâche motrice. L'analyse des résultats de l'évolution de la tâche ajoutée réalisée par Célestine Schreiber pourrait aider à répondre à cette problématique. D'après les observations de Li et al. (2001), lorsqu'une tâche cognitive et une tâche de marche sont combinées, les jeunes adultes ont tendance à accorder généralement la priorité à la tâche cognitive. En admettant que les deux groupes, CONT et INT, se soient concentrés sur la tâche cognitive, le groupe INT aurait augmenté sa performance d'équilibre en y portant moins d'attention que le groupe CONT après un entraînement d'équilibre non spécifique à la tâche. Les résultats du nombre d'erreurs effectuées lors de la double tâche cognitive au niveau « Hard » (Figure 10), bien que non significatifs, montrent une amélioration de 16.67% pour le groupe INT. Le groupe CONT a également une

amélioration très proche de 14.29%. Nous ne pouvons donc pas affirmer que le groupe INT ait priorisé la tâche cognitive à la tâche d'équilibre dans cette condition.

4.3 Evolution du coût de la double tâche après un entraînement à l'équilibre ST

En ce qui concerne les mesures du DTC dans les 4 conditions d'équilibre en DT, le seul impact significatif a été observé dans la condition « Easy balance + Cognitive » pour l'interaction Temps *Groupe ($p=0.040$). Cependant, les analyses post-hoc n'ont pas révélé de résultats significatifs au sein de chaque groupe. Effectivement, lorsque l'évolution de 2 groupes se croise en sens opposé comme le cas présent (Figure 11), l'interaction temps*groupe a de fortes chances d'être significative. Face à cette situation, il serait intéressant d'observer plus en détail l'évolution de la performance de la tâche cognitive ajoutée à la tâche d'équilibre mesurée. Il se pourrait que l'évolution des performances de la tâche cognitive ait une relation avec le changement de performance dans la tâche d'équilibre. Ces résultats seront explorés dans le travail de Célestine Schreiber, qui se concentrera davantage sur les effets de l'entraînement DT. L'inclusion de ces données supplémentaires permettrait de mieux comprendre les effets de la tâche cognitive sur l'équilibre et d'obtenir des résultats plus complets. Dans le cas présent, le groupe INT aurait besoin de plus d'attention sur la deuxième tâche (cognitive) au niveau « Easy » entre les mesures du pre-test et celles du post-test (Li et al., 2001; Lim et al., 2015).

L'étude menée par Lüder et al. (2018) soulèvent des points de discussion importants. Les auteurs ont conclu que l'entraînement d'équilibre en simple tâche et en double tâche aurait la même influence sur la capacité de double tâche chez les adolescents. Dans cette étude, nous n'avons observé aucune variation significative du DTC entre le pre-test et le post-test. Il est important de rappeler que nous avons eu un groupe qui a suivi une intervention tandis que le groupe CONT n'a suivi aucun entraînement. Lüder et al. (2018) comparent un groupe d'intervention ST avec un groupe d'intervention DT, ce qui ne permet pas de comparer exactement les différences entre le pre- et le post-test dans notre étude. Toutefois, il est possible que les différences de population étudiées aient joué un rôle dans les résultats divergents. Lüder et al. ont étudié des adolescents, tandis que cette étude s'est concentrée sur des jeunes adultes en bonne santé. Les capacités cognitives et motrices peuvent varier entre ces deux groupes d'âge, ce qui pourrait avoir une incidence sur la manière dont l'entraînement d'équilibre influence la capacité de double tâche (Li et al., 2001).

Les résultats obtenus lors des pre-tests et des post-tests dans les conditions « Easy balance + Cognitive » et « Hard balance + Cognitive » ont révélé des valeurs négatives pour le DTC dans les deux groupes, à savoir le groupe CONT et le groupe INT. Ces résultats suggèrent que l'ajout

d'une tâche cognitive a un effet positif en interférant de manière favorable sur la tâche principale d'équilibre. Pavão et al. (2021) avaient également observé des améliorations dans la tâche motrice qui consistait à tenir en équilibre sur des surfaces instables lorsqu'une tâche cognitive de comptage à rebours était ajoutée. Plus le niveau de difficulté de la tâche cognitive était élevé, meilleure était la performance de la tâche motrice. Dans leur étude, le centre de pression a servi de référence pour le calcul de la stabilité. Les auteurs ont interprété que des exigences cognitives élevées peuvent inciter les participants à donner la priorité à la tâche motrice pour garder l'équilibre, ce qui aurait pour conséquence des augmentations plus faibles de la vitesse de déplacement du centre de pression pendant la DT par rapport à des tâches cognitives plus faciles. Comme les résultats ont évolué dans la même direction que Pavão et al. (2021), il est possible que les causes de cette évolution soient concordantes. Bien que l'évolution du facteur temps n'était pas significative dans les calculs du DTC en condition « E-BC », il est important de souligner que le groupe INT a présenté une augmentation du DTC de 11,52%, tandis que le groupe CONT a connu une diminution du DTC de -10,81%. Des résultats qui sont à nouveau à l'encontre de nos attentes avec une amélioration pour le groupe CONT et une péjoration du groupe INT. Sachant que l'équilibre en ST s'améliore avec un entraînement spécifique (Donath et al., 2017; Giboin et al., 2015; Kümmel et al., 2016), un entraînement spécifique en DT permettrait éventuellement de marquer des écarts significatifs entre les différents groupes en améliorant soit la tâche d'équilibre, soit la deuxième tâche, ou les deux tâches simultanément. D'autres études pourraient amener certains éclaircissements sur cette problématique.

Lors des tâches d'équilibre avec ajout de tâche motrice (garder la bille au centre du plateau), les coûts de double tâche (DTC) ont augmenté chez le groupe d'intervention (INT) au post-test dans les conditions « Easy balance + Motor » et « Hard balance + Motor ». Cette augmentation suggère que l'ajout de la tâche motrice a eu un impact négatif sur la performance du groupe INT après l'entraînement, bien que ces résultats n'aient pas atteint un niveau significatif dans les deux niveaux de difficulté. Lorsque le DTC augmente en condition « Hard balance + Motor », les valeurs de Sway dans la même condition ont, elles, tendance à baisser. Dans le cas où les valeurs Sway diminuent lors des mesures d'équilibre en ST, l'augmentation du DTC lors de la DT motrice peut être interprétée de façon à ce que l'ajout d'une deuxième tâche (ici tenir une bille en équilibre sur un plateau) perturbe davantage les participants après l'entraînement qu'avant l'entraînement. Ceci bien que la performance d'équilibre Sway ait augmenté après l'entraînement.

4.4 Limites

4.4.1 *Fréquence et volume d'entraînements*

Les résultats contradictoires observés dans notre étude peuvent être expliqués par certaines limites de la méthodologie, notamment en ce qui concerne le contenu de l'entraînement qui n'était pas spécifiquement adapté à la tâche d'équilibre mesurée. Notre programme d'entraînement (voir chap. 2 : Méthode) n'était pas basé sur les recommandations spécifiques de Lesinski et al. (2015). Leur étude systématique, qui a examiné 25 études éligibles, a montré que 16 à 19 séances d'entraînement d'équilibre peuvent être efficaces pour améliorer l'équilibre stable. De plus, ils ont observé que l'entraînement trois fois par semaine était plus efficace que deux ou quatre fois par semaine. Il est donc possible que le contenu et la dose insuffisante de notre programme d'entraînement aient limité l'effet sur les performances d'équilibre en double tâche. Afin de mieux comprendre l'influence de l'entraînement sur l'équilibre en double tâche, des études futures devraient tenir compte des recommandations de volume, de fréquence et de contenu d'entraînement issus de recherches antérieures, telles que celle de Lesinski et al. (2015). De plus, il convient également de rappeler que les mesures d'équilibre en laboratoire ont été suivies immédiatement par des tests neurophysiologiques réalisés sur la même plateforme. Le temps passé sur la plateforme pour la suite du test pourrait induire un effet d'entraînement spécifique chez tous les participants, qu'ils appartiennent au groupe INT ou au groupe CONT. Les travaux de Egger et al. (2021) ont effectivement montré que la performance augmente significativement uniquement lors de 6 essais sur la même plateforme utilisée dans cette étude. Lors des tests neurologiques qui ont suivi directement, la récolte de donnée de cette étude, les participants ont passé environ 24 minutes sur la plateforme. Bien qu'ils ne devaient pas se concentrer sur la performance, cette séquence pourrait potentiellement biaiser les résultats de l'étude en confondant les effets de l'entraînement avec les effets de la familiarisation à la plateforme. Les entraînements ST réalisés dans cette étude étaient effectivement généraux et non spécifiques à la tâche d'équilibre évaluée lors des tests. Afin de mieux comprendre les effets spécifiques de l'entraînement en ST sur la performance d'équilibre en DT, il serait utile de mener des recherches futures comparant un groupe d'entraînement en ST spécifique à la tâche avec un groupe d'entraînement en ST général sur la performance d'équilibre en DT. En résumé, les limitations de cette étude comprennent la possibilité d'un effet d'entraînement spécifique dû au temps passé sur la plateforme, le manque de spécificité des entraînements en tâche simple et la nécessité de recherches futures pour mieux comprendre les effets spécifiques de ces entraînements.

5 Conclusion

L'objectif de ce travail était d'observer l'influence d'un entraînement d'équilibre sur la performance d'équilibre en double tâche. En conclusion, cette étude suggère que l'entraînement en ST peut améliorer l'équilibre en ST. Cependant, nous ne pouvons pas affirmer qu'il est aussi efficace pour améliorer la performance d'équilibre en DT étant donné que le groupe CONT a également démontré des améliorations dans plusieurs conditions de DT. En ce qui concerne le coût de la double tâche, aucune évolution significative n'a été observée dans les conditions d'équilibre en DT. Des recherches futures devraient tenir compte des recommandations antérieures concernant le volume, la fréquence et le contenu de l'entraînement, ainsi que l'inclusion d'un groupe d'entraînement en ST spécifique à la tâche pour une meilleure compréhension des effets spécifiques de l'entraînement sur la performance d'équilibre en DT.

6 Bibliographie

- Abbruzzese, L. D., Rao, A. K., Bellows, R., Figueroa, K., Levy, J., Lim, E., & Puccio, L. (2014). Effects of manual task complexity on gait parameters in school-aged children and adults. *Gait & Posture*, *40*(4), 658-663.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.07.017>
- Beurskens, R., Steinberg, F., Antoniewicz, F., Wolff, W., & Granacher, U. (2016). Neural Correlates of Dual-Task Walking: Effects of Cognitive versus Motor Interference in Young Adults. *Neural Plasticity*, *2016*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2016/8032180>
- Colledge, N. R., Cantley, P., Peaston, I., Brash, H., Lewis, S., & Wilson, J. A. (1994). Ageing and balance: the measurement of spontaneous sway by posturography. *Gerontology*, *40*(5), 273-278. <https://doi.org/10.1159/000213596>
- Domínguez-Navarro, F., Igual-Camacho, C., Silvestre-Muñoz, A., Roig-Casasús, S., & Blasco, J. M. (2018). Effects of balance and proprioceptive training on total hip and knee replacement rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*, *62*, 68-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.003>
- Donath, L., Roth, R., Zahner, L., & Faude, O. (2017). Slackline Training (Balancing Over Narrow Nylon Ribbons) and Balance Performance: A Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*, *47*(6), 1075-1086. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0631-9>
- Duval, S., Bouchard, C., & Pagé, P. (2017). Le développement des fonctions exécutives chez les enfants. *Les dossiers des sciences de l'éducation*, 121-137.
<https://doi.org/10.4000/dse.1948>
- Egger, S., Wälchli, M., Rüeger, E., & Taube, W. (2021). Interference of balance tasks revisited: Consolidation of a novel balance task is impaired by subsequent learning of a similar postural task. *Gait & Posture*, *84*, 182-186.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.12.015>
- Famose, J. 1990. *Apprentissage moteur et difficulté de la tâche*. Paris : INSEP-Éditions. doi :10.4000/books.insep.1301
- Giboin, L.-S., Gruber, M., & Kramer, A. (2015). Task-specificity of balance training. *Human Movement Science*, *44*, 22-31.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.012>
- Gruber, M., & Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *European Journal of Applied Physiology*, *92*(1-2), 98-105. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1080-y>

- Kiss, R., Brueckner, D., & Muehlbauer, T. (2018). Effects of Single Compared to Dual Task Practice on Learning a Dynamic Balance Task in Young Adults. *Front Psychol*, 9, 311. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00311>
- Krampe, R. T., Schaefer, S., Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (2011). Lifespan changes in multi-tasking: Concurrent walking and memory search in children, young, and older adults. *Gait & Posture*, 33(3), 401-405. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.12.012>
- Kümmel, J., Kramer, A., Giboin, L.-S., & Gruber, M. (2016). Specificity of Balance Training in Healthy Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 46(9), 1261-1271. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0515-z>
- Lesinski, M., Hortobágyi, T., Muehlbauer, T., Gollhofer, A., & Granacher, U. (2015). Dose-Response Relationships of Balance Training in Healthy Young Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 45(4), 557-576. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0284-5>
- Li, K. Z. H., Lindenberger, U., Freund, A. M., & Baltes, P. B. (2001). Walking While Memorizing: Age-Related Differences in Compensatory Behavior. *Psychological Science*, 12(3), 230-237. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00341>
- Lim, J., Amado, A., Sheehan, L., & Van Emmerik, R. E. A. (2015). Dual task interference during walking: The effects of texting on situational awareness and gait stability. *Gait & Posture*, 42(4), 466-471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.07.060>
- Lüder, B., Kiss, R., & Granacher, U. (2018). Single- and Dual-Task Balance Training Are Equally Effective in Youth. *Front Psychol*, 9, 912. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00912>
- Marchesi, G., De Luca, A., Squeri, V., De Michieli, L., Vallone, F., Pilotto, A., Leo, A., Casadio, M., & Canessa, A. (2022). A Lifespan Approach to Balance in Static and Dynamic Conditions: The Effect of Age on Balance Abilities [Original Research]. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.801142>
- Pavão, S. L., Lima, C. R. G., & Rocha, N. (2021). Effects of motor and cognitive manipulation on the dual-task costs of center of pressure displacement in children, adolescents and young adults: A cross-sectional study. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 84, 105344. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2021.105344>
- Pellecchia, G. L. (2005). Dual-task training reduces impact of cognitive task on postural sway. *J Mot Behav*, 37(3), 239-246. <https://doi.org/10.3200/jmbr.37.3.239-246>

- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000). What is balance? *Clin Rehabil*, 14(4), 402-406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Predel, C., Kaminski, E., Hoff, M., Carius, D., Villringer, A., & Ragert, P. (2020). Motor Skill Learning-Induced Functional Plasticity in the Primary Somatosensory Cortex: A Comparison Between Young and Older Adults. *Front Aging Neurosci*, 12, 596438. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.596438>
- Priest, A. W., Salamon, K. B., & Hollman, J. H. (2008). Age-related differences in dual task walking: a cross sectional study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-29>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans Biomed Eng*, 43(9), 956-966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Riach, C. L., & Hayes, K. C. (1987). Maturation of postural sway in young children. *Dev Med Child Neurol*, 29(5), 650-658. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1987.tb08507.x>
- Ruffieux, J., Keller, M., Lauber, B., & Taube, W. (2015). Changes in Standing and Walking Performance Under Dual-Task Conditions Across the Lifespan. *Sports Medicine*, 45(12), 1739-1758. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0369-9>
- Schaefer, S., Krampe, R., Lindenberger, U., & Baltes, P. (2008). Age Differences Between Children and Young Adults in the Dynamics of Dual-Task Prioritization: Body (Balance) Versus Mind (Memory). *Developmental psychology*, 44, 747-757. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.3.747>
- Sherrington, C., Whitney, J. C., Lord, S. R., Herbert, R. D., Cumming, R. G., & Close, J. C. T. (2008). Effective Exercise for the Prevention of Falls: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American Geriatrics Society*, 56(12), 2234-2243. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2008.02014.x>
- Silsupadol, P., Shumway-Cook, A., Lugade, V., Van Donkelaar, P., Chou, L.-S., Mayr, U., & Woollacott, M. H. (2009). Effects of Single-Task Versus Dual-Task Training on Balance Performance in Older Adults: A Double-Blind, Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(3), 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2008.09.559>
- Tasvuran Horata, E., Cetin, S. Y., & Erel, S. (2021). Effects of individual progressive single- and dual-task training on gait and cognition among older healthy adults: a randomized-controlled comparison study. *European Geriatric Medicine*, 12(2), 363-370. <https://doi.org/10.1007/s41999-020-00429-5>

- Taube, W., Bracht, D., Besemer, C., & Gollhofer, A. (2010). The Effect of Inline Skating on Postural Control in Elderly People. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, *61*, 45-51.
- Taube, W., Gruber, M., Beck, S., Faist, M., Gollhofer, A., & Schubert, M. (2007). Cortical and spinal adaptations induced by balance training: correlation between stance stability and corticospinal activation. *Acta Physiologica*, *189*(4), 347-358.
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2007.01665.x>
- Taube, W., Gruber, M., & Gollhofer, A. (2008). Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training and their functional relevance. *Acta Physiologica*, *193*(2), 101-116. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2008.01850.x>
- The jamovi project (2023). *jamovi* (Version 2.2.5) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>
- Thomas, R., Beck, M. M., Lind, R. R., Korsgaard Johnsen, L., Geertsen, S. S., Christiansen, L., Ritz, C., Roig, M., & Lundbye-Jensen, J. (2016). Acute Exercise and Motor Memory Consolidation: The Role of Exercise Timing. *Neural Plast*, *2016*, 6205452.
<https://doi.org/10.1155/2016/6205452>
- Verhagen, E., Van Der Beek, A., Twisk, J., Bouter, L., Bahr, R., & Van Mechelen, W. (2004). The Effect of a Proprioceptive Balance Board Training Program for the Prevention of Ankle Sprains. *The American Journal of Sports Medicine*, *32*(6), 1385-1393.
<https://doi.org/10.1177/0363546503262177>
- Wälchli, M., Ruffieux, J., Mouthon, A., Keller, M., & Taube, W. (2018). Is Young Age a Limiting Factor When Training Balance? Effects of Child-Oriented Balance Training in Children and Adolescents. *Pediatric Exercise Science*, *30*(1), 176-184.
<https://doi.org/10.1123/pes.2017-0061>
- Ward, N., Menta, A., Ulichney, V., Raileanu, C., Wooten, T., Hussey, E. K., & Marfeo, E. (2021). The Specificity of Cognitive-Motor Dual-Task Interference on Balance in Young and Older Adults. *Front Aging Neurosci*, *13*, 804936.
<https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.804936>
- Wollesen, B., & Voelcker-Rehage, C. (2014). Training effects on motor–cognitive dual-task performance in older adults. *European Review of Aging and Physical Activity*, *11*(1), 5-24. <https://doi.org/10.1007/s11556-013-0122-z>
- Zech, A., Hübscher, M., Vogt, L., Banzer, W., Hänsel, F., & Pfeifer, K. (2010). Balance training for neuromuscular control and performance enhancement: a systematic review. *J Athl Train*, *45*(4), 392-403. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-45.4.392>

7 Annexes

Déclaration de consentement (1/2)



UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

SCIENCES DU MOUVEMENT ET DU SPORT
BEWEGUNGS- UND SPORTWISSENSCHAFTEN

Déclaration de consentement pour la participation à l'étude pilote

Dual task durant des tâches d'équilibre

- Lisez attentivement le formulaire ci-dessous.
- En cas d'incompréhension ou besoin de précisions, demandez des informations supplémentaires

Le/la signataire confirme :

- Je garantis qu'aucun des critères d'exclusion suivants ne me concerne :
 - *Perturbations neurologiques ou motrices*
 - *Maladies ou blessures cérébrales et/ou cardiovasculaires graves*
 - *Grossesse*
 - *Epilepsie*
 - *Pacemaker*
 - *Implants auditifs*
 - *Métal dans le corps*
- Je sais que je peux interrompre l'étude à chaque instant sans conséquences négatives, même si j'ai signé cette déclaration de consentement.
- Je comprends que toute donnée personnelle, les résultats des tests ainsi que la participation à l'étude sont traités confidentiellement et anonymement, et ne sont disponibles qu'aux chercheurs directement impliqués dans l'étude.
- J'accepte que les données récoltées soient publiées de manière anonyme et dans une forme non-identifiable dans une ou plusieurs publications scientifiques.
- Je me propose volontairement en tant que participant à l'étude nommée ci-dessus.
- Les moyens de mesures neurophysiologiques et leurs risques m'ont été expliqués.
- **Electromyographie de surface (EMG) :**

Lors de l'EMG, l'activité musculaire de différents muscles est recueillie par des électrodes. Pour cela, un endroit précis de la peau au-dessus du muscle doit être rasée et nettoyée à l'aide d'un produit désinfectant. Dans certains cas, une irritation superficielle de la peau peut se développer. Les câbles des électrodes sont regroupés en faisceaux et fixés sur la peau. Aucun effets secondaires lors de l'utilisation de l'EMG n'ont été démontrés.
- **Stimulation magnétique transcrânienne (TMS) :**

Durant la TMS, les neurones sont dépolarisés grâce à une bobine magnétique. La dépolarisation mène à des contractions musculaires qui sont enregistrées par l'EMG. Les personnes étant prédestinées à des effets secondaires sévères sont exclues de la TMS (voir critères d'exclusion). Bien que la méthode ne soit pas invasive ni douloureuse, certaines personnes peuvent ressentir la TMS comme étant désagréable. Parfois, la TMS peut mener à de légers maux de tête de courte durée. D'autres effets secondaires important ou sur le long terme n'ont pas été démontrés.

Déclaration de consentement (2/2)



- **Stimulation nerveuse périphérique (PNS)**

La PNS est composé d'une cathode et d'une anode. Ces deux électrodes sont collées sur la peau, à des endroits précis permettant de stimuler un nerf particulier. Pour ce faire, de brefs courants électriques sont émis et circulent de la cathode à l'anode, en passant par les tissus corporels. Ces courants électriques sont alors capables de stimuler les nerfs qu'ils traversent, engendrant une contraction des muscles innervés par ces nerfs. La PNS est donc une méthode de stimulation nerveuse non-invasive. Pour cette étude, le nerf tibial est stimulé en fixant l'anode à l'avant du genou et la cathode à l'arrière du genou.

- Les éventuelles questions ont pu être posées et ont reçu une réponse claire.
- J'ai lu et compris les informations relatives à l'étude et accepte les conditions.

Participant/e

Nom et Prénom :

Signature :

Personne ayant expliqué les informations relatives à l'étude

Je confirme avoir expliqué au participant nommé ci-dessus le genre, le but, la durée ainsi que les effets et les risques de cette étude.

Nom et prénom :

Signature :

Protocol des tests d'équilibre (1/2)

Dual-Task Balance Study

Code: _____
 Age: _____
 Sex: _____
 Height: _____
 Weight: _____

Group: _____ (Control/Single/Dual)

Foot position: _____ cm (toe→front edge)

EMG settings:

	Position	<u>Pre-test</u>	Post-test
TA <u>Mmax</u> (intensity)	check while sitting		
TA <u>Mmax</u> (μ V)			
TA <u>aMT</u> (%MSO)	check while standing (easy balance)		
TA test pulse (% MT)			
TA condition pulse (% MT)			

- default settings for paired pulse: 70% (condition) and 120% (test)

Balance board setting (tension #):

	<u>Pre-test</u>	Post-test
Easy		
Hard		

Condition order:

	<u>Pre-test</u>	Post-test
Stable balance (start exp't)	1	1
Stable balance (mid exp't)	5	5
Stable balance (end exp't)	9	9
Easy balance		
Easy balance & motor		
Easy balance & n-back		
Hard balance		
Hard balance & motor		
Hard balance & n-back		

Notes:

- two trials per condition
- repeat all easy and hard balance task conditions – once without TMS, once with TMS (same order)
- each TMS trial = 120 s
- each no TMS trial (i.e., performance) = 30 s

Protocol des tests d'équilibre (2/2)

n-back performance:

<u>Pre-Test</u>	File #	# Correct	Post-Test	File #	# Correct
Practice trial 1			Practice trial 1		
Practice trial 2			Practice trial 2		
Easy performance trial 1			Easy performance trial 1		
Easy performance trial 2			Easy performance trial 2		
Hard performance trial 1			Hard performance trial 1		
Hard performance trial 2			Hard performance trial 2		
Easy with TMS trial 1			Easy with TMS trial 1		
Easy with TMS trial 2			Easy with TMS trial 2		
Hard with TMS trial 1			Hard with TMS trial 1		
Hard with TMS trial 2			Hard with TMS trial 2		

Overview performance	<u>Pre</u>	Post
Easy balance		I
Easy motor		
Easy n-back		
Hard balance		
Hard motor		
Hard n-back		

Additional notes:

8 Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers mon conseiller, Michael Waelchli, pour son accompagnement et ses conseils constants tout au long de cette étude. Je remercie également Yves-Alain Kuhn et Matteo Bugnon qui se sont rendus disponibles pour accompagner plusieurs mesures. Mes remerciements s'étendent à Craig Tokuno pour sa contribution en mettant à disposition les données récoltées et en participant activement aux tests en laboratoire. Ma reconnaissance va également à tous les participants de cette étude pour leur disponibilité et leur investissement sans lesquels, cette étude n'aurait pas pu avoir lieu. Je souhaite également remercier toutes les autres personnes pour la relecture et leur soutien moral durant cette période.