

UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE MÉDECINE

En collaboration avec la
HAUTE ÉCOLE FÉDÉRALE DE SPORTS DE MACOLIN

LES MECANISMES D'INHIBITION INTRACORTICALE DIFFERENT-ILS ENTRE LES JEUNES ET LES
SENIORS LORS D'EXERCICES D'EQUILIBRE DYNAMIQUE ?

Travail final pour l'obtention du Master en
Sciences du Mouvement et du sport
Option Enseignement

Conseiller
Prof. Dr. Wolfgang TAUBE

Co-conseiller-ère
Audrey MOUTHON
Yves-Alain KUHN

Caroline UDRY
Fribourg, Avril 2017

Table des matières

1	Acronymes	3
2	Résumé	4
3	Introduction.....	6
3.1	Etudes antérieures	6
3.2	Objectifs de l'étude.....	7
4	Partie théorique.....	8
4.1	Equilibre	8
4.2	Déclin de l'équilibre relatif à l'âge.....	11
4.3	Voie cortico-spinale	13
4.4	Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)	13
4.5	Inhibition intracorticale : neurotransmetteurs GABAs	15
4.6	Electromyographie	16
5	Méthode	17
5.1	Sujets.....	17
5.2	Procédures expérimentales	17
6	Résultats.....	20
6.1	Analyses statistiques	20
6.2	Résultats du SOL	20
6.3	Résultats du TA	24
7	Discussion	29
7.1	Influence de l'âge sur la SICI et le MEP au niveau du SOL?	29
7.2	Influence de l'âge sur la SICI et le MEP au niveau du TA?.....	31
7.3	Différences observées entre le SOL et le TA	32
7.4	Influence de l'anticipation d'une action sur les résultats entre le groupe des jeunes et celui des seniors au niveau du SOL et du TA?	34
7.5	Limites du travail	35
8	Conclusion et perspectives de nouvelles questions de recherche.....	37

9 Bibliographie	39
10 Annexes	44
10.1 Questionnaire sur le taux d'activité physique au quotidien (QAPPA).....	44
10.2 Questionnaire sur le taux de chutes au quotidien.....	46
11 Remerciements	48
12 Déclaration personnelle	49
13 Déclaration de cession des droits d'auteur	49

1 Acronymes

CS	Stimulus de conditionnement
EMG	Electromyogramme/Electromyographie
GABA	Acide gamma aminobutyrique
GM	Gastrocnemius
ICI	Inhibition intracorticale
ISI	Intervalle inter-stimulus
MEP	Potentiel évoqué moteur
MT	Seuil moteur
Rback	Random back
Rfront	Random front
rMT	Seuil moteur au repos
SEM	Erreur standard de la moyenne
SICI	Inhibition intracorticale à court intervalle
SOL	Soleus
TA	Tibialis anterior
TMS	Stimulation magnétique transcrânienne
TS	Stimulus de test (Contrôle)

2 Résumé

Contexte. Bien que des chercheurs aient étudié le sujet de l'impact de l'âge au niveau du contrôle neuronal sur l'équilibre statique, nous connaissons peu de choses en ce qui concerne l'équilibre dynamique. Egalement peu de recherches scientifiques ont mis l'accent sur les effets de l'anticipation au niveau d'exercices d'équilibre dynamique.

Objectif. Cette étude vise à décrire la différence d'excitabilité cortico-spinale ainsi que d'inhibition intracorticale (ICI) entre les jeunes et les seniors à l'aide de deux protocoles de stimulation magnétique transcrânienne (TMS): (1) TMS à impulsion unique mesurant l'excitabilité cortico-spinale et (2) TMS à double impulsion, mesurant l'inhibition intracorticale à court intervalle (SICI) avec un intervalle inter-stimulus de 2.5 millisecondes. La présente étude permet aussi d'observer si le fait qu'une action puisse être anticipée ou non influe le niveau d'inhibition intracorticale au sein du cortex moteur primaire.

Méthode. Dans cette expérience, nous avons utilisé une plateforme customisée qui provoque des perturbations antéro-postérieures et postéro-antérieures ainsi que la TMS afin de comparer le potentiel évoqué moteur (MEP) et la SICI de 18 jeunes et 15 seniors. Les sujets ont dû mettre à l'épreuve leur équilibre dans cinq conditions: une condition d'équilibre statique (Stand), deux conditions d'équilibre dynamique avec une possibilité d'anticipation (Back et Front) et deux conditions d'équilibre dynamique sans anticipation (Random back [Rback] et Random front [Rfront]).

Résultats. Les résultats trouvés dans le muscle soleus (SOL) et dans le muscle tibialis anterior (TA) au niveau du MEP et de la SICI n'ont pas montré d'effets significatifs ni entre les groupes, ni entre les interactions (Groupes x Conditions). De plus, au niveau de la SICI, aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions dans le SOL, néanmoins, un effet significatif a été observé entre les conditions Rback/Stand dans le TA.

Concernant le MEP, certaines différences entre les conditions divergent au niveau des deux muscles. Dans le SOL, un effet significatif a été observé entre les conditions Back/Stand, Rback/Stand, Rfront/Stand, Front/Back, Front/Rfront ainsi que Front/Rback alors que dans le TA, cet effet est visible entre toutes les conditions (Back, Front, Rback, Rfront) et la condition Stand, ainsi qu'entre les conditions Back/Rfront et Front/Rfront. De plus, une différence significative a été observée entre les conditions Back/Front ainsi que Rfront/Stand uniquement dans le groupe des jeunes au niveau du SOL alors que pour le TA, un effet significatif a été aperçu entre les conditions Front/Stand, Rback/Stand, Rfront/Stand, Back/Stand, Front/Rfront et Back/Rfront uniquement dans le groupe des seniors.

Conclusion. Les données de cette étude ont permis d'analyser l'impact de l'âge au niveau de plusieurs conditions d'exercices d'équilibre dynamique. Certaines études antérieures ont montré des résultats contradictoires entre les deux générations au niveau de la SICI et du MEP lors d'exercices d'équilibre statique. En ce qui concerne la différence durant des exercices d'équilibre dynamique, nos résultats suggèrent qu'il n'y a pas de différences globales significatives entre les deux groupes mais la raison pour laquelle aucune différence n'a été trouvée entre les jeunes et les seniors ne reste cependant pas très claire. Les différences obtenues entre les conditions expérimentées Front/Rfront et Back/Rback ont également montré que le fait qu'une action puisse être anticipée influence les résultats uniquement lorsque la plateforme bouge vers l'arrière et que le participant part vers l'avant (Front/Rfront).

3 Introduction

3.1 Etudes antérieures

De nombreux scientifiques se sont interrogés sur l'impact de l'âge au niveau du contrôle neuronal sur l'équilibre, mais uniquement en se focalisant sur des exercices statiques (Papegaaij, Taube, et al., 2016; Papegaaij, Baudry, Négyesi, Taube, & Hortobágyi, 2016; Papegaaij, Taube, Baudry, Otten, & Hortobágyi, 2014; Papegaaij, Taube, Hogenhout, Baudry, & Hortobágyi, 2014; Petersen, Rosenberg, Petersen, & Nielsen, 2009). Cependant, certains résultats de ces études se contredisent. Papegaaij et ses collègues (2016) ont suggéré que cette différence de résultats, que nous allons voir ci-dessous, pourrait être attribuable aux diverses méthodologies utilisées lors des expériences, aux muscles analysés, aux tranches d'âge sélectionnées et à la difficulté de la tâche demandée (Papegaaij, Baudry, et al., 2016).

Jusqu'à ce jour, Papegaaij et collègues ont effectué différentes études concernant l'équilibre statique. Selon une de leurs premières études (Papegaaij, Taube, Baudry, et al., 2014), le vieillissement entraîne une réorganisation du contrôle cortical du mouvement volontaire, une augmentation de l'activité cortico-spinale et une diminution de l'inhibition corticale. Une autre étude (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014) a montré une plus petite inhibition intracorticale à court intervalle (de l'anglais *short-interval intracortical inhibition*; SICI) chez les personnes âgées que chez les jeunes dans des tâches d'équilibre au niveau du muscle tibialis anterior (TA). Mais cela a encore été mieux démontré lors d'exercices d'équilibre avec une proprioception altérée par un tapis de mousse (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). De plus, l'excitabilité cortico-spinale était également plus grande chez les personnes âgées par rapport aux jeunes lors du contrôle postural de la position verticale (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). Dans une étude publiée deux ans plus tard (Papegaaij, Baudry, et al., 2016), les résultats obtenus ont confirmé ce que ces chercheurs avaient trouvé auparavant. Une réduction de la SICI était visible dans le muscle TA et aucun changement de la SICI lié à l'âge n'a été trouvé dans le muscle soleus (SOL). Papegaaij, Baudry et collègues ont suggéré que cela était attribuable au fait que les projections cortico-spinales du SOL sont plus faibles que celles du TA. Mais grâce à cette recherche, une diminution de la SICI a tout de même été observée dans le SOL lorsque tous les sujets, jeunes et plus âgés, ont passé d'une tâche ne concernant pas l'équilibre à une tâche d'équilibre (Papegaaij, Baudry, et al., 2016). Cependant dans une autre étude, Papegaaij, Taube et collègues (2016) n'ont trouvé aucune différence entre les personnes âgées et les jeunes au niveau de l'inhibition intracorticale (de

l'anglais *intracortical inhibition*; ICI) du SOL. Il faut tout de même prendre en compte le fait que les expérimentateurs ont ajusté les défis posturaux au niveau des compétences de chaque participant. Ainsi, l'exercice de se pencher en avant ou de garder l'équilibre sur un tapis en mousse était beaucoup plus compliqué chez les seniors que chez les jeunes. Cela serait certainement dû à des changements liés à l'âge (pour plus d'informations, se rendre au chapitre 4.2. Déclin de l'équilibre relatif à l'âge) (Papegaaij, Taube, et al., 2016).

Toutefois, deux autres recherches ne concernant pas l'équilibre ont montré des résultats inverses à propos de l'ICI. Kossev et ses collègues (2002) ont révélé par leur expérience que l'ICI était plus grande chez les personnes âgées que chez les jeunes dans les muscles fléchisseurs et extenseurs du poignet. Cette étude a aussi mis en évidence de plus grands potentiels évoqués moteurs (MEP) chez les personnes âgées, ce qui veut dire une plus grande excitabilité cortico-spinale. L'étude de McGinley et ses collègues (2010) a également montré une plus grande ICI chez les personnes âgées que chez les jeunes, dans les muscles fléchisseurs du poignet dans des conditions de repos.

Par conséquent, la présente étude visait à analyser la SICI et le MEP du TA et du SOL non pas lors d'exercices d'équilibre statique comme les études citées ci-dessus mais lors d'exercices d'équilibre dynamique. Le but principal étant de percevoir si une différence était observable entre le groupe des jeunes et celui des seniors.

3.2 Objectifs de l'étude

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'impact de l'âge au niveau du contrôle neuronal sur l'équilibre dynamique. Y a-t-il une plus grande SICI chez les seniors ou chez les jeunes ? Nous avons émis l'hypothèse qu'une plus petite SICI serait observée chez les jeunes par rapport aux personnes âgées durant des exercices d'équilibre dynamique. De plus, nous nous attendions également à une plus grande taille des MEPs tests chez les seniors par rapport aux jeunes.

Cette étude avait également pour but d'analyser si une action anticipée ou non influait sur l'activité des circuits inhibiteurs intracorticaux de types GABAergiques. Petersen et ses collègues (2009) ont montré que chaque fois qu'une personne faisait un mouvement, des réactions posturales involontaires se mettaient en place afin qu'elle puisse garder l'équilibre. Ils ont démontré dans cette étude que le fait qu'une action soit anticipée ou non changeait la rapidité de mise en place des mouvements réflexes. Ils ont analysé la participation du tractus cortico-spinal à l'activation du SOL chez les participants de cette étude, qui, debout, devaient

élever volontairement leurs talons, puis l'activation posturale du SOL lorsque les sujets tiraient la poignée d'une porte et enfin l'activation réflexe du SOL lorsque les sujets étaient brusquement tirés vers l'avant par une perturbation externe. Dans les activités permettant une anticipation, une réaction anticipatoire a été observée 75 millisecondes avant le début de l'électromyographie (EMG) alors que dans les actions non anticipatoires, la réaction arrivait seulement juste avant le début de l'EMG et serait donc déclenchée par le mouvement du corps. La conclusion de cette expérience appuie l'hypothèse que le fait qu'une action anticipée ou non peut modifier les résultats obtenus (Petersen et al., 2009). Nous avons donc émis l'hypothèse que le fait qu'une action puisse être anticipée ou non pourrait changer la valeur des résultats obtenus au niveau de la SICI et du MEP dans les deux muscles analysés (SOL et TA). Par exemple, dans la présente étude, si le sujet debout sur une plateforme mobile connaissait la direction du mouvement de la plateforme, il pouvait se préparer et anticiper la perturbation; ce qui n'était pas possible si le sujet ne savait pas à l'avance dans quelle direction la plateforme allait bouger. Selon notre hypothèse, les résultats devraient être différents. Pour répondre à ces questions, une série de tests a été proposée aux participants afin d'évaluer leur équilibre et de mesurer la SICI ainsi que le MEP perçus dans le SOL et le TA de leur jambe droite dans les diverses conditions d'équilibre.

Cette étude commence par une brève explication des termes scientifiques utilisés lors de l'expérience. La deuxième partie de cette étude présente une description de la méthode de la recherche expérimentale. Suite à cela, une analyse détaillée des résultats sera exposée, et finalement cette étude se terminera par une discussion, une réflexion sur les limites de ce travail et sur ce qui serait intéressant d'étudier à l'avenir ainsi que par une conclusion.

4 Partie théorique

4.1 Equilibre

Le corps humain est composé d'os, d'une colonne vertébrale, d'articulations et de muscles qui se coordonnent afin de permettre à l'être humain de rester debout en équilibre contre les forces de gravité. Les muscles qui permettent de tenir debout sont contrôlés par l'encéphale et par des mécanismes réflexes se trouvant dans les réseaux neuronaux de la moelle épinière et du tronc cérébral (Vander, Sherman, Luciano, & Brière, 1995, p. 343-344). L'humain, ayant un corps allongé, se maintient en équilibre sur le polygone de sustentation (base toute petite

formée par les pieds) dans lequel le centre de gravité, se trouvant au niveau du bassin, doit se projeter afin qu'il puisse garder l'équilibre et rester en position debout (Le Goïc, 2013; Mouzat, Dabonneville, Roux, Borges, & Bertrand, 2005; Vander et al., 1995, p. 344). Dès que le centre de gravité sort de ce polygone, les risques de déséquilibre augmentent fortement. Afin de contrer ces déséquilibres, l'humain a la chance de posséder des réflexes posturaux qui lui permettent de rester debout et d'empêcher la chute (Vander et al., 1995, p. 344). Par exemple le réflexe vestibulo-oculaire qui permet de fixer le regard sur un point particulier lors du mouvement de la tête (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 313), les ajustements posturaux comme les réflexes d'étirement et d'extension (Vander et al., 1995, p. 344) ou encore des mouvements correcteurs qui permettent à l'ensemble du corps de se déplacer afin de garder l'équilibre (Bouisset & Maton, 1999, p. 489-490) sont quelques automatismes qui permettent d'empêcher la chute.

Deux sortes d'équilibre sont distinguables ; l'équilibre statique, qui représente la tenue de la position du corps et de la tête par rapport à la force de gravité et l'équilibre dynamique qui représente la tenue de la position du corps suite à des mouvements soudains, comme des rotations, accélérations et décélérations (Tortora & Grabowski, 1994, p. 517).

La posture du corps est essentiellement règlementée par trois systèmes; le système visuel, le système proprioceptif et le système vestibulaire (Rousseu & Crémieux, 2004).

4.1.1 Système visuel. Le système visuel permet à l'être humain de s'orienter et de se déplacer dans l'espace, de prendre conscience de la position et du mouvement de chaque segment de son corps, d'éviter les obstacles et d'anticiper les mouvements. Les informations qui proviennent de ce système sont donc très importantes au niveau de l'orientation, de l'équilibre et de la posture (Brunetti, 2016 ; Le Goïc, 2013). Lors d'exercice d'équilibre, ce système permet de se focaliser sur un point en fournissant à l'humain des points de repère (Le Goïc, 2013). Les informations perçues par les yeux permettent à l'être humain de se construire une carte visuelle de l'espace qui l'entoure (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 259). Deux mouvements oculaires ont pour fonction de stabiliser le regard et de compenser les mouvements de la tête. Ce sont les mouvements vestibulo-oculaires qui répondent aux mouvements rapides de la tête et les mouvements optocinétiques qui sont sensibles aux mouvements lents (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 438-440).

4.1.2 Système proprioceptif. Ce système permet de renseigner l'être humain sur la position de son corps dans l'espace ainsi que sur la position d'un membre du corps par rapport aux autres parties du corps (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p. 197; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 189, 196; Tortora & Grabowski, 1994, p. 469; Vander et al., 1995, p. 234). Il donne des informations relatives aux mécanorécepteurs des muscles, des tendons, des articulations et de la peau (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 189; Tortora & Grabowski, 1994, p. 464, 468; Vander et al., 1995, p. 234). Le corps humain est constitué de plusieurs récepteurs, appelés propriocepteurs, qui renseignent sur la position spatiale de ce dernier et qui sont sensibles à la pression, à l'étirement ainsi qu'à la tension des diverses parties du corps (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 196, 198). Ces récepteurs contiennent les fuseaux neuromusculaires dans les muscles squelettiques, les organes tendineux de Golgi dans les tendons et les récepteurs kinesthésiques des articulations dans les capsules articulaires (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p.198; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 196; Tortora & Grabowski, 1994, p. 469; Vander et al., 1995, p. 234). Les propriocepteurs permettent au cerveau de recevoir en permanence les informations des différentes parties du corps, ce qui lui permet de faire constamment des ajustements afin que le corps ait une bonne coordination et puisse faire des mouvements complexes avec précision. Ils envoient au système nerveux, tout ce qu'il doit savoir afin de pouvoir contracter les muscles dans le but de garder l'équilibre (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p. 197, 208; Tortora & Grabowski, 1994, p. 469).

4.1.3 Système vestibulaire. Ce système détecte l'orientation spatiale, les mouvements du corps et de la position de la tête et permet de stabiliser le regard, la tête et la posture (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 303, 312, 319). L'oreille interne contient le vestibule, appelé également appareil vestibulaire, qui perçoit les mouvements et les changements de position de la tête (Vander et al., 1995, p. 249). L'appareil vestibulaire est formé de trois canaux semi-circulaires membraneux et de deux renflements en forme de sac, l'utricule et le saccule (Vander et al., 1995, p. 249). Les parois de l'utricule et du saccule sont composées d'une petite région plus épaisse qui forme un épithélium sensoriel, la macule, constituée de cellules ciliées et qui joue un rôle dans l'équilibre statique ainsi que dynamique (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p. 317-318; Purves,

Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 307; Tortora & Grabowski, 1994, p. 517). Au niveau de l'équilibre statique, les macules renseignent sur la position de la tête par rapport à l'axe vertical et permettent aux humains de se maintenir en équilibre. Au niveau de l'équilibre dynamique, elles informent sur les accélérations et décélérations linéaires de la tête (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 304; Tortora & Grabowski, 1994, p. 517).

Les canaux semi-circulaires sont composés à leur base d'un renflement bulbeux, l'ampoule, qui contient l'épithélium sensoriel et qui est constitué de cellules ciliées. La disposition spécifique des canaux semi-circulaires leur permet de renseigner l'être humain sur les accélérations et décélérations angulaires de la tête, comme les rotations (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p. 324; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 304, 310; Tortora & Grabowski, 1994, p. 517; Vander et al., 1995, p. 249).

L'utricule, le saccule ainsi que les canaux semi-circulaires sont donc composés de cils. Ces derniers sont stimulés uniquement lors des changements de vitesse de la tête et ce sont eux qui détectent les mouvements (Vander et al., 1995, p. 249, 251).

Les informations transmises au système nerveux par le système vestibulaire ont plusieurs fonctions principales: elles permettent de stabiliser le regard et de contrôler les muscles des yeux afin que ceux-ci puissent fixer le même endroit lorsque la tête bouge et change de position. Elles jouent un rôle dans les mécanismes réflexes pour que l'être humain puisse tenir en position debout. Elles interviennent dans le soutien et l'orientation de la tête lors des mouvements ainsi que dans les réflexes induits par les déplacements. Et pour finir, elles permettent de prendre conscience de la position et de l'accélération du corps dans l'espace (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara et al., 2005, p. 315; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 312, 319; Vander et al., 1995, p. 251).

Les messages venant de ces trois systèmes sont rassemblés et analysés ensemble afin que l'humain soit en mesure de percevoir la position et l'orientation de son corps dans l'espace (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 319).

4.2 Déclin de l'équilibre relatif à l'âge

Certains scientifiques ont déjà prouvé qu'avec l'âge, nous assistons à un déclin de l'équilibre (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). Des chercheurs ont pu observer une diminution

de la force musculaire, une dégradation des capacités sensorielles telles que la vision et la proprioception, un ralentissement de la vitesse de conduction de l'influx nerveux et également une modification des réflexes spinaux (Kossev et al., 2002; McGinley et al., 2010; Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014).

Papegaaij, Taube, Baudry et collègues (2014) ont ainsi établi un tableau de trois domaines de changements liés à l'âge (voir *Figure 1*). Ces trois types de changements sont : les changements structurels, les changements fonctionnels et les changements comportementaux. En vieillissant, une détérioration structurelle et fonctionnelle provoque des changements lors de la sortie motrice. Les changements structurels correspondent à une altération de la matière grise et de la matière blanche ainsi qu'à celle des nerfs périphériques (dégénérescence des structures cérébrales et nerveuses). Les modifications fonctionnelles concernent la manière dont ces structures agissent lors d'une tâche motrice. Elles sont considérées comme négatives lorsque une détérioration sensorielle relative aux changements structurels est observée mais elles peuvent également être considérées positivement si elles représentent une compensation à la détérioration. Les changements de comportement se réfèrent aux changements dans la performance de la tâche demandée (Papegaaij, Taube, Baudry, et al., 2014). Plusieurs éléments sont donc touchés par ces changements, que ce soit au niveau de la musculature, au niveau des sens (vision et proprioception) ou du contrôle neuronal, de la dégradation de structures dans l'appareil locomoteur, cardio-vasculaire et dans le système nerveux (McGinley et al., 2010; Papegaaij, Taube, Baudry, et al., 2014; Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014).

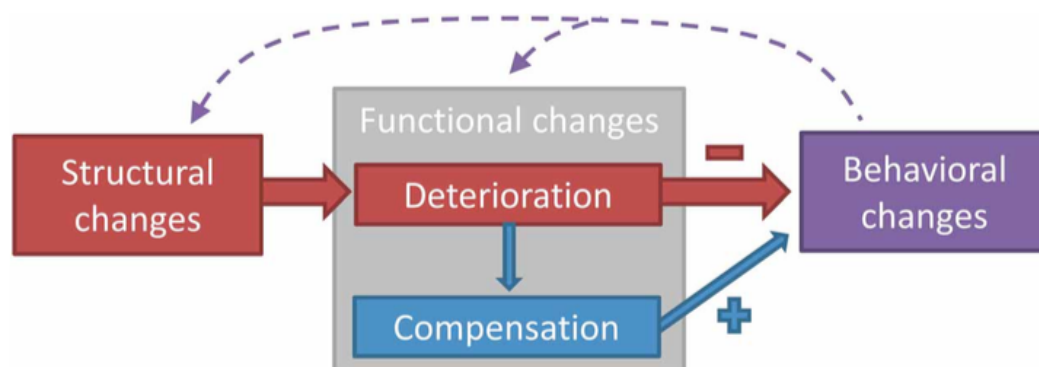


Figure 1. Illustration de la classification des différents domaines de changements liés à l'âge. Les flèches indiquent les liens entre ces différents domaines. Le + et le - indiquent que les changements fonctionnels peuvent être considérés comme positifs ou négatifs (Papegaaij, Taube, Baudry, et al., 2014).

4.3 Voie cortico-spinale

La voie cortico-spinale, également appelée voie pyramidale, permet le déclenchement des mouvements volontaires ainsi que leur exécution. Elle part des neurones pyramidaux du cortex cérébral moteur primaire se trouvant dans le lobe frontal et se termine par les muscles squelettiques striés, les effecteurs. L'être humain possède deux voies pyramidales, une gauche et une droite car chaque hémicorps est assuré par une voie. Au niveau du bulbe rachidien se trouve la décussation motrice, où la plupart des fibres de la voie cortico-spinale droite croisent les fibres de la voie cortico-spinale gauche. C'est ainsi que les fibres provenant du cortex moteur droit contrôlent les muscles sur le côté gauche du corps et inversement (Tortora & Grabowski, 1994, p. 430, 475; Vander et al., 1995, p. 233).

4.4 Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)

La TMS est une technique de stimulation neuronale non invasive où un champ magnétique est déclenché par un simulateur relié à une bobine électromagnétique en forme de huit. La bobine induit un courant électrique grâce au champ magnétique, lui-même induit par une pulsation électrique circulant dans la bobine de cuivre selon le principe de Michael Faraday. Ce courant électrique dépolarise les neurones (Kobayashi & Pascual-Leone, 2003; Rotenberg, Horvath, & Pascual-Leone, 2014, p. 71; Valero-Cabré, Pascual-Leone, & Coubard, 2011). La bobine est placée sur le cuir chevelu du sujet juste au-dessus du cortex moteur primaire controlatéral. Le champ magnétique produit crée de faibles impulsions électriques qui provoquent un MEP dans le muscle choisi (Di Lazzaro & Rothwell, 2014). Le MEP est une réponse du muscle à la TMS. Dans le contexte de cette étude, l'emplacement optimal de la bobine sur le crâne, appelé hot spot, est trouvé lorsque le plus grand MEP possible dans les deux muscles cibles est produit: le gastrocnemius (GM, qui n'est pas traité dans ce travail) et le SOL droit. Pour trouver cet emplacement, il est nécessaire de fixer des électrodes sur les 3 muscles analysés des participants (SOL, TA et GM). A ce moment-là, les participants assis sur une chaise doivent totalement relâcher leurs muscles. En déplaçant la bobine de 0.5 cm en 0.5 cm sur la partie centrale gauche de leur tête, le point idéal qui montre un MEP dans les deux muscles (GM et SOL) peut être trouvé. L'endroit choisi est alors indiqué à l'aide d'un feutre permettant à l'expérimentateur de garder la bobine au même emplacement tout au long de l'expérience. Cette marque sur le cuir chevelu permet également de poser directement au bon endroit un casque fait sur mesure pour cette expérience, muni de velcros afin de fixer et de soutenir la bobine. Une fois que ceci est fait, le seuil moteur au repos (rMT), qui est le niveau

d'intensité le plus faible auquel un MEP entre 50 et 100 μ V est perçu dans les muscles analysés au moins cinq fois sur dix stimulations consécutives, peut être établi. Pour établir ce seuil moteur, des stimuli uniques sont appliqués sur le cortex moteur des sujets se tenant debout (Papegaaij, Taube, et al., 2016; Papegaaij, Baudry, Négyesi, Taube, & Hortobágyi, 2016).

4.4.1 TMS à impulsion unique et TMS à double impulsion. Il faut également différencier la TMS à impulsion unique (*single-pulse* TMS en anglais) de la TMS à double impulsion (*paired-pulse* TMS en anglais). La première correspond à une stimulation non-répétitive qui implique une seule impulsion. L'intervalle entre les impulsions doit être d'au moins quatre secondes afin qu'il n'y ait pas d'accumulations des effets de chaque impulsion individuelle (Valero-Cabré et al., 2011). Cette impulsion est souvent appliquée à 120 % du seuil moteur et elle provoque des MEPs qui peuvent être détectés dans le muscle cible (Kossev et al., 2002). Elle permet d'observer l'excitabilité et l'intégrité des connexions cortico-spinales (Rotenberg, Horvath, & Pascual-Leone, 2014, p. 118)

La TMS à double impulsion est une stimulation impliquant deux stimuli distincts provenant de la même bobine et appliqués à différents intervalles. Elle permet d'explorer le comportement d'une autre population de neurones, les neurones de types GABAergiques ainsi que d'observer l'excitabilité et l'intégrité des connexions cortico-corticales (Heise et al., 2013; Kobayashi & Pascual-Leone, 2003; Rotenberg et al., 2014, p. 118). La première impulsion correspond au stimulus conditionné (CS), c'est une impulsion qui équivaut à environ 80 % du seuil moteur et la seconde équivaut au stimulus de test (TS) qui est à 120 % du seuil moteur (Abbruzzese, Assini, Buccolieri, Schieppati, & Trompetto, 1999). Cette technique de TMS permet d'observer les mécanismes d'inhibition (SICI) et de facilitation (FCI; qui n'est pas traitée dans ce travail) intracorticales. L'expérimentateur a la possibilité de moduler les intervalles entre ces deux impulsions, appelés intervalles inter-stimulus (ISI), afin d'obtenir, selon son choix, soit une inhibition, soit une facilitation des réseaux nerveux (Ilić et al., 2002). Si l'ISI se situe entre 8 et 30 ms, une facilitation intracorticale est observée mais s'il se trouve entre 1 et 6 ms c'est une ICI (Sanger, Garg, & Chen, 2001). Cela est observable grâce à l'amplitude des MEPs. Si l'amplitude du MEP augmente dans le muscle cible, une facilitation est aperçue alors que s'il diminue, c'est une inhibition qui est trouvée (Chen et al., 1998; Di Lazzaro & Ziemann, 2013; Kossev et al., 2002; Kujirai et al., 1993; Lazzaro et al.,

1998; Oliveri et al., 2000; Orth, Snijders, & Rothwell, 2003; Ziemann, Rothwell, & Ridding, 1996).

Dans la présente étude, nous nous sommes essentiellement attardés sur la SICI qui permet donc d'observer l'excitabilité des circuits inhibiteurs dans le cortex moteur primaire (Di Lazzaro et al., 2006). Afin de quantifier cette inhibition, la SICI est exprimée en ratio par rapport au MEP contrôle (TS) de la personne analysée, qui lui, est provoqué par la TMS à impulsion unique à 120 % du rMT (Daskalakis, Christensen, Fitzgerald, Roshan, & Chen, 2002). Lors de la SICI, la première impulsion magnétique avec un CS entre 50-90 % du rMT excite uniquement les neurones inhibiteurs GABA-A qui sont sensibles à un seuil plus bas que les facilitateurs. Ensuite lorsque la deuxième impulsion magnétique arrive 2.5 ms après la première impulsion avec un TS à 120 % du rMT, cela active les neurones inhibiteurs ainsi que les excitateurs. Mais l'ISI étant plus petit que six millisecondes, le TS ne peut pas fonctionner entièrement sur les neurones qui n'ont pas encore eu le temps de récupérer des effets du CS (Rotenberg et al., 2014, p. 119-120; Valero-Cabré et al., 2011). Néanmoins il ne faut pas uniquement s'arrêter aux ISIs car d'autres études ont démontré qu'une inhibition ou une facilitation peut être provoquée en modifiant l'intensité des stimuli CS et TS (Di Lazzaro et al., 2006; Ilić et al., 2002; Peurala, Müller-Dahlhaus, Arai, & Ziemann, 2008).

4.5 Inhibition intracorticale : neurotransmetteurs GABAs

Plusieurs neurotransmetteurs sont impliqués dans le processus de l'ICI. Les neurotransmetteurs GABAs (acide gamma-aminobutyrique), aussi appelés neuromédiateurs, sont des substances chimiques synthétisées dans les neurones et contenues dans les vésicules pré-synaptiques d'un neurone. Lors du passage de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre, le premier neurone va les relâcher dans l'espace synaptique qui le sépare du neurone suivant afin de rectifier son activité. Il y a donc un premier signal électrique pré-synaptique, le potentiel d'action qui va libérer un signal chimique, les neurotransmetteurs (les messagers) qui en se fixant aux récepteurs post-synaptiques vont se transformer en message électrique post-synaptique (Rigoard et al., 2009; Tortora & Grabowski, 1994, p. 379). Cela est appelé un potentiel post-synaptique inhibiteur quand les messages sont constitués de neurotransmetteurs GABAs et un potentiel post-synaptique exciteur lorsque le déclenchement du potentiel d'action dans le deuxième neurone est facilité (Connors, Malenka, & Silva, 1988; Di Lazzaro & Rothwell, 2014; Di Lazzaro & Ziemann, 2013; Reece et al., 2012, p. 1222). Certains neurotransmetteurs sont connus comme des excitateurs car ils dépolarisent la membrane post-

synaptique, mais les GABAs sont les principaux inhibiteurs du système nerveux central, c'est-à-dire qu'ils diminuent ou qu'ils arrêtent l'activité du neurone post-synaptique pendant un certain temps (Chen et al., 1998; Connors et al., 1988; Heise et al., 2013; Sanger et al., 2001; Tortora & Grabowski, 1994, p. 379). Pour les libérer, des neurones inhibiteurs sont excités et relâchent ainsi des neurotransmetteurs GABAs qui vont provoquer une hyperpolarisation de la membrane post-synaptique du neurone suivant. La membrane du deuxième neurone ne va donc plus pouvoir créer de potentiels d'action, ce qui va empêcher le passage du message aux neurones suivants (Gallimard, 2001, p. 104 ; Tortora & Grabowski, 1994, p.379). Il n'existe pas qu'une seule sorte de neurotransmetteurs GABA. Ainsi, l'ICI est régulée par différents interneurons et types de récepteurs de l'acide gamma-aminobutyrique comme les récepteurs GABA-A, GABA-B et GABA-C. Les récepteurs GABA-A et GABA-C sont des récepteurs ionotropes, canaux ioniques activés par un ligand, qui provoquent des réponses électriques post-synaptiques rapides alors que les récepteurs GABA-B sont des récepteurs métabotropes qui provoquent une réponse électrique plus lente et plus durable (Connors et al., 1988; Di Lazzaro et al., 2006; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p. 123, 139). Selon plusieurs études, ce serait les récepteurs GABA-A qui seraient impliqués au niveau de la SICI (Connors et al., 1988; Daskalakis et al., 2002; Di Lazzaro et al., 2006; Ilić et al., 2002; Peurala et al., 2008; Sanger et al., 2001).

4.6 Electromyographie

L'électromyographie est un processus qui permet de développer des signaux myoélectriques, de les enregistrer et finalement de les étudier. Ces signaux reportent l'état des membranes des fibres musculaires et rendent donc possible l'analyse de l'activation neuromusculaire volontaire des muscles lors d'exercices posturaux (Konrad, 2005). Dans la présente étude, cette technique a été utilisée pour enregistrer les réponses des muscles SOL et TA induites par les stimuli provoqués par la TMS sur le cortex moteur.

Couplé à la TMS, l'EMG est utilisée afin de pouvoir observer le MEP des muscles cibles. Pour que les signaux des muscles soient perçus avec une qualité suffisante, il est nécessaire de préparer la peau en la rasant et la nettoyant afin que les électrodes y adhèrent correctement mais également afin d'éviter une résistance au niveau peau-électrodes dans le but d'obtenir une diminution de l'impédance (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). Les électrodes sont alors placées sur les trois muscles cibles (SOL, TA et GM). Une électrode de référence est également positionnée au niveau du plateau tibial sur une bande de référence humide afin

de limiter les interférences. Des câbles relient les électrodes bipolaires de surface (Blue sensor P, Ambu, Bad Nauheim, Germany) à un ordinateur afin de pouvoir enregistrer et traiter les données.

5 Méthode

5.1 Sujets

Trente-trois personnes se sont portées volontaires afin de réaliser cette étude. Nous avons demandé à 18 jeunes adultes âgés entre 21 et 34 ans (13 femmes) et 15 seniors âgés entre 66 et 77 ans (13 femmes) d'exécuter différentes tâches d'équilibre afin de comparer les résultats obtenus entre les deux générations. Les données de trois jeunes participants ont été exclues de l'analyse finale car un problème est survenu lors de l'enregistrement et certaines valeurs sont donc absentes. Les sujets, n'ayant pas tous les mêmes caractéristiques de condition physique, ont dû remplir deux petits questionnaires afin que leur taux d'activité physique (QAPPA) et que leur taux de chutes (chuteurs ou non chuteurs) soient déterminés et puissent être comparés.

Tous les participants ont lu et signé une déclaration de consentement affirmant qu'ils ont pris connaissance de leurs droits et qu'ils ne remplissaient aucun critère d'exclusion, à savoir: troubles neurologiques, crises d'épilepsie, implants intracrâniens ou cochléaires, lésions cérébrales, blessures orthopédiques sévères, consommation de drogues ainsi que grossesse. Nous leur avons transmis toutes les informations nécessaires au bon déroulement de l'étude et répondu à toutes leurs questions.

5.2 Procédures expérimentales

Cette étude peut être séparée en deux parties : la préparation et l'équilibre dynamique.

5.2.1 Préparation. La première étape de cette étude consistait à répondre à deux petits questionnaires. Le premier concernait l'activité physique hebdomadaire des sujets et le second portait sur leur taux de chutes au quotidien. Ces deux questionnaires ont servi à classer les sujets en différents groupes : sportifs, moyen sportifs, pas sportifs et chuteurs ou non-chuteurs.

Ensuite, après avoir équipé les participants avec les électrodes, une calibration a été effectuée afin de vérifier si les électrodes étaient bien placées sur les trois muscles: SOL, TA et GM. Cependant, cette étude s'est uniquement concentrée sur les données du SOL et du TA.

5.2.2 Equilibre dynamique. Pour la deuxième partie de cette étude, la TMS a été appliquée sur le cortex moteur primaire controlatéral. Les MEPs du SOL et du TA de la jambe droite ont été analysés. Tout d'abord, il a fallu trouver le hot spot de chaque participant. Ce point se situait sur le crâne des sujets et permettait de déclencher un MEP dans le SOL et le TA. Etant donné que les muscles cibles appartenaient à la jambe droite, le hot spot a été cherché sur la moitié gauche du cerveau. Ensuite, le casque a été fixé et le seuil moteur (MT) défini lorsque le participant était debout. Pour ces exercices, une plateforme customisée qui provoquait des perturbations toutes les 10 secondes, a été utilisée (voir *Figure 2*).

Premièrement, les individus, à pieds nus, ont été testés vers l'avant (Front; perturbation antéro-postérieure), puis vers l'arrière (Back; perturbation postéro-antérieure) sans TMS en augmentant petit à petit la difficulté des paliers: huit paliers vers l'avant, et huit paliers vers l'arrière répétés chacun cinq fois afin de pouvoir analyser le niveau de la personne sans impulsion magnétique. Les participants ont été également sollicités afin d'indiquer, selon leur ressenti, le degré de difficulté à tenir en équilibre sur une échelle allant de 1 à 15; 1 étant extrêmement facile et 15 extrêmement difficile.

Ensuite, la TMS a été appliquée. Le niveau du palier choisi a été adapté, pour l'expérience avec la TMS, au ressenti de chaque participant. Dans cette expérience, le champ magnétique de la TMS a été déclenché par une MagPro X100 avec un simulateur magnétique MagOption (both MagVenture A/S, Farum-shaped, Denmark), relié à une bobine électromagnétique en forme de huit appelée 95-mm focal « butterfly-shaped » coil (D-B80). Un écran a été placé devant le participant, lui permettant de regarder son EMG. Cela devait lui permettre de ne pas anticiper musculairement les mouvements vers l'avant et l'arrière. Au cours de toute l'expérience, l'EMG a été enregistrée afin de récolter les données des muscles analysés. Les données de l'EMG ont été traitées grâce au programme MATLAB (R2014b; MathWorks, Natick, MA, USA), enregistrées puis stockées sur un ordinateur grâce au programme IMAGO RECORD (Pfitec Biomedical Systems, Enderingen, Germany).

Les cinq conditions dans lesquelles les sujets ont dû mettre à l'épreuve leur équilibre étaient: une condition d'équilibre statique (Condition *Stand*), deux conditions d'équilibre dynamique avec une possibilité d'anticipation (Condition *Back* et Condition *Front*) et deux conditions

d'équilibre dynamique sans anticipation (Condition *Random back* appelée *Rback* et Condition *Random front* appelée *Rfront*). Un signal sonore était émis deux secondes avant que la plateforme ne bouge afin d'avertir les participants et la stimulation induite par la TMS s'est faite environ deux millisecondes avant la perturbation.



Figure 2. Illustration d'un sujet positionné sur la plateforme qui provoque des perturbations. Le sujet est muni d'un casque accroché à la bobine de la TMS. Deux électrodes sont placées sur le SOL, le TA et le GM.

Tout d'abord, 24 stimulations ont été effectuées sur le sujet debout sur la plateforme de perturbation, sans que celle-ci ne bouge (Condition *Stand*). Les premières huit stimulations étaient des stimulations fantômes où rien ne se passait. Pour les huit suivantes, une seule stimulation à impulsion unique a été envoyée à 120 % du seuil moteur afin de déclencher un MEP. Quant aux huit dernières, une double stimulation avec un intervalle de 2.5 ms entre les deux impulsions visait à provoquer un SICI.

Les deux exercices suivant l'expérience précédente consistaient en 48 stimulations aléatoires répétées deux fois. Parmi ces stimulations, 24 étaient perturbées vers l'avant (Condition *Rback*) et 24 vers l'arrière (Condition *Rfront*), aléatoirement. Les 24 stimulations vers l'avant et l'arrière étaient constituées de huit stimulations fantômes, huit stimulations à impulsion unique et huit stimulations à double impulsion. Ensuite, le premier exercice (Condition *Stand*) a été répété.

Finalement, les derniers exercices correspondaient à deux fois 24 stimulations. Tout d'abord, la plateforme se déplaçait 24 fois vers l'avant (Condition *Back*), puis 24 fois vers l'arrière (Condition *Front*). La répartition des stimulations était organisée dans le même ordre que celui du premier exercice: huit stimulations fantômes, huit MEPs et huit SICI.

6 Résultats

6.1 Analyses statistiques

La version 3.3.2 de R (R Foundation for Statistical Computing) a été utilisée pour toutes les analyses statistiques. Avant de comparer les variables entre elles, une analyse de répartition de celles-ci a été effectuée en utilisant le test de Shapiro-Wilk. Afin de comparer les données, une mixed design ANOVA 2 X 5 (2 = Groupes: *Seniors* et *Jeunes* et 5 = Conditions: *Back*, *Front*, *Rback*, *Rfront*, *Stand*) a été appliquée. Le test de sphéricité de Mauchly a été appliqué lors de l'ANOVA. En cas de significativité de celui-ci, les degrés de liberté ont été corrigés avec la méthode de Greenhouse-Geisser. Toutes les données ont été reportées comme la moyenne \pm l'erreur standard de la moyenne (SEM). Le niveau de significativité a été défini à $p \leq 0.05$. En présence d'effets significatifs dans les différentes analyses effectuées, les résultats ont été soumis à des tests *post-hoc* Benjamini-Hochberg afin de corriger les *t*-tests appariés et de confirmer leur significativité (Benjamini & Hochberg, 1995).

La SICI a été exprimée en pourcentage de l'inhibition par rapport au MEP test en utilisant la formule suivante : $[100 - (\text{MEP conditionné} / \text{MEP test} \times 100)]$ (Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). Plus le pourcentage de SICI obtenu était grand, plus l'ICI était élevée. Au niveau du MEP, plus la valeur en millivolt (mV) était élevée, plus l'excitabilité cortico-spinale était grande.

6.2 Résultats du SOL

6.2.1 SICI. En ce qui concerne l'analyse de la SICI des sujets au niveau du SOL de la jambe droite, l'ANOVA n'a pas révélé de modulation significative entre le groupe de personnes âgées (38.17 ± 4.31 %) et le groupe de jeunes (39.85 ± 5.91 %), avec un effet principal entre les deux groupes de : $F(1, 28) = 0.08, p = 0.779, \eta^2 = 0.002$.

Avec un effet principal entre les conditions de : $F(3.08, 86.32) = 0.86, p = 0.466, \eta^2 = 0.01$, l'ANOVA entre les cinq conditions (Back: 36.53 ± 3.91 %; Front: 41.81 ± 3.34 %; Rback: 40.07 ± 3.49 %; Rfront: 36.52 ± 3.68 %; Stand: 40.12 ± 3.93 %) n'a également montré aucune différence significative.

De plus, avec une interaction (Groupes x Conditions) entre les deux groupes et les cinq conditions de : $F(3.08, 86.32) = 0.12$, $p = 0.952$, $\eta^2 = 0.002$, aucun effet significatif n'a été observé (voir *Figure 3*). En outre, les différences entre les conditions analysées dans chacun des deux groupes n'ont également indiqué aucune modulation significative.

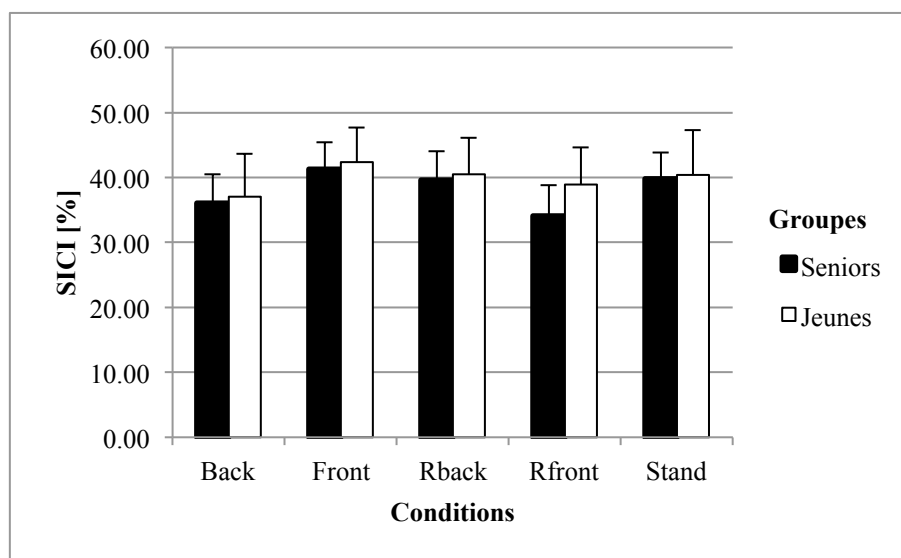


Figure 3. Pourcentage de l'inhibition intracorticale à court intervalle (SICI) pour les deux groupes et les cinq conditions. Aucun différence significative de l'interaction (Groupes x Conditions) n'a été trouvée (Seniors/Back: 36.05 ± 4.45 %; Jeunes/Back: 37.02 ± 6.6 %; Seniors/Front: 41.24 ± 4.2 %; Jeunes/Front: 42.38 ± 5.35 %; Seniors/Rback: 39.63 ± 4.39 %; Jeunes/Rback: 40.52 ± 5.58 %; Seniors/Rfront: 34.11 ± 4.76 %; Jeunes/Rfront: 38.92 ± 5.72 %; Seniors/Stand: 39.85 ± 4.04 %; Jeunes/Stand: 40.40 ± 6.9 %; Interaction entre les groupes et les conditions: $p = 0.466$). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

6.2.2 MEP. Concernant l'analyse du MEP des sujets dans le muscle SOL de la jambe droite, les résultats montrent avec un effet principal entre les groupes de: $F(1, 28) = 1.03$, $p = 0.32$, $\eta^2 = 0.03$, qu'aucune modulation significative n'a été trouvée au niveau de l'excitabilité cortico-spinale entre les personnes âgées (1.10 ± 0.14 mV) et les jeunes (0.93 ± 0.13 mV).

Toutefois, avec un effet principal entre les conditions de: $F(2.45, 68.46) = 8.26$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.05$, l'ANOVA entre les cinq conditions (Back, Front, Rback, Rfront et Stand) a révélé un effet significatif. L'effet entre les différentes conditions étant significatif, il est alors nécessaire d'analyser entre quelles conditions une différence significative est observée. Les tests *post-hoc* ont ainsi permis de découvrir une modulation significative entre les conditions

Back/Front ($p = 0.005$), Back/Stand ($p = 0.015$), Front/Rback ($p = 0.009$), Front/Rfront ($p = 0.005$), Rback/Stand ($p = 0.005$) et Rfront/Stand ($p = 0.004$; voir *Figure 4*).

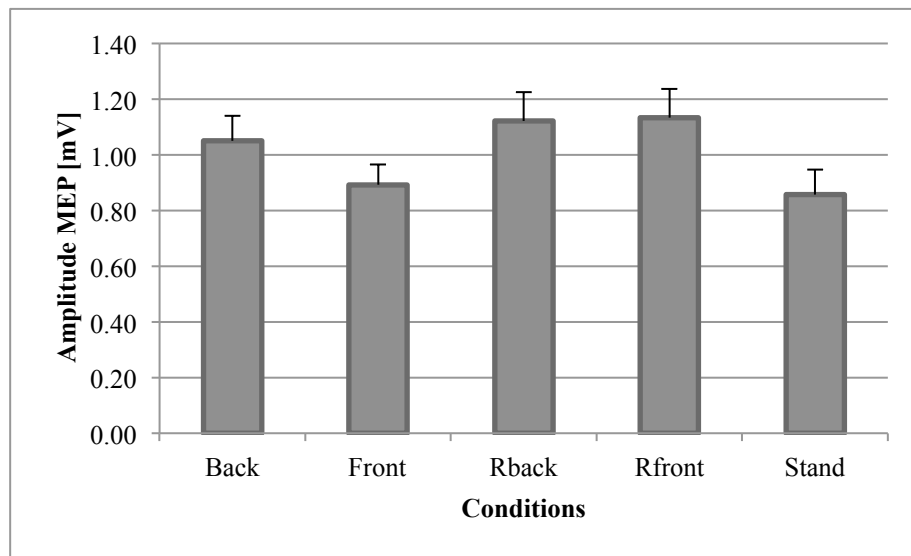


Figure 4. Amplitude (en millivolt) des potentiels évoqués moteurs (MEPs) au niveau du soleus (SOL) entre les cinq conditions (Back: 1.05 ± 0.09 mV; Front: 0.89 ± 0.07 mV; Rback: 1.12 ± 0.1 mV; Rfront: 1.13 ± 0.1 mV; Stand: 0.86 ± 0.09 mV; Effet principal entre les conditions: $p < 0.001$). Une différence significative est observée entre certaines conditions (Back/Front: $p = 0.005$; Back/Stand: $p = 0.015$; Front/Rback: $p = 0.009$; Front/Rfront: $p = 0.005$; Rback/Stand: $p = 0.005$; Rfront/Stand: $p = 0.004$). Les différences significatives entre les barres n'ont pas été représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Cependant, avec une interaction (Groupes x Conditions) de : $F(2.45, 68.46) = 0.28$, $p = 0.796$, $\eta^2 = 0.002$, aucun effet significatif au niveau de l'interaction entre les deux groupes et les cinq conditions n'a été observé (voir *Figure 5A*).

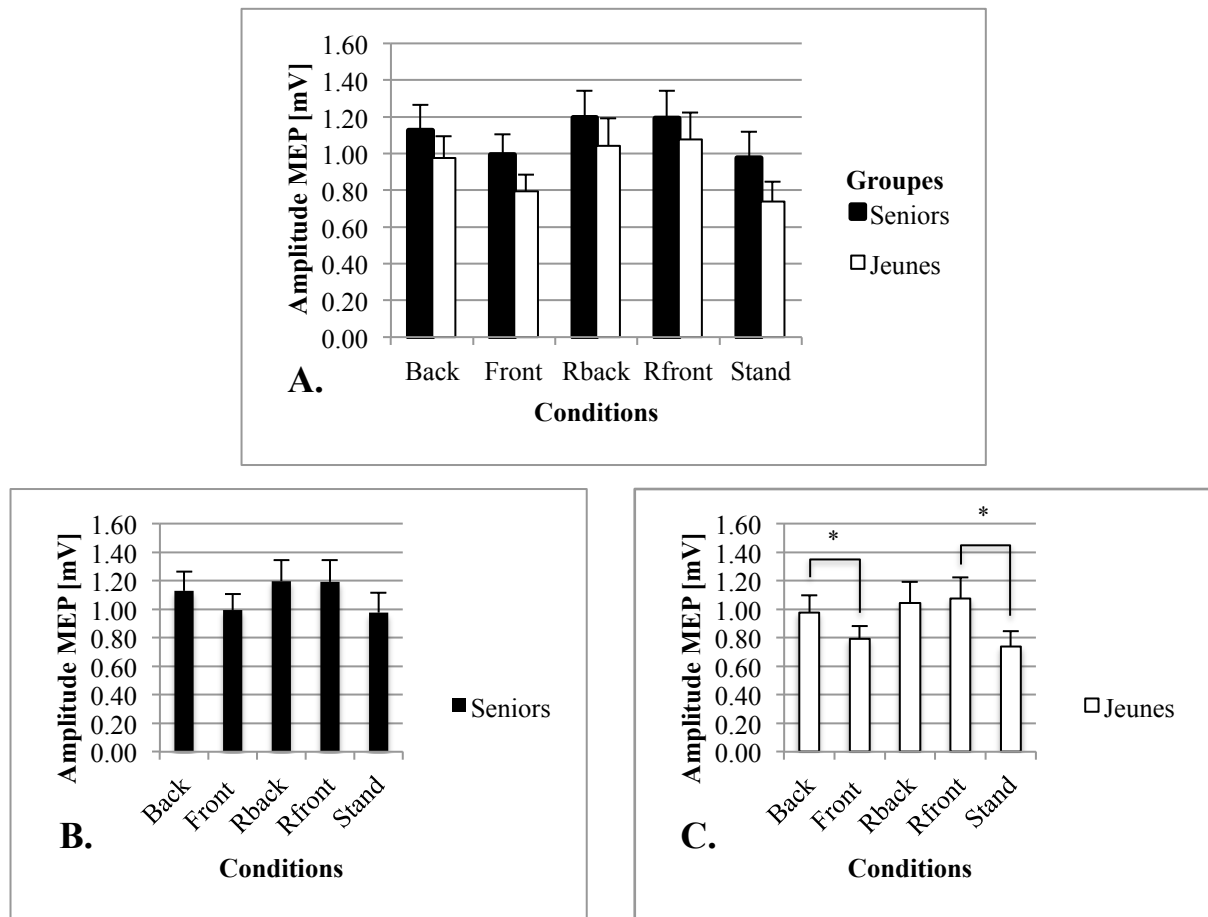


Figure 5. **A.** Amplitude (en millivolt) des potentiels évoqués moteurs (MEPs) de l'interaction entre les groupes et les conditions au niveau du soleus (SOL). Aucune différence significative de l'interaction (Conditions x Groupes) n'a été trouvée ($p = 0.796$). **B.** Amplitude des MEPs entre les conditions du groupe des seniors. Aucun effet significatif entre les conditions n'est visible dans ce groupe (Back: 1.13 ± 0.14 mV; Front: 0.99 ± 0.11 mV; Rback: 1.2 ± 0.15 mV; Rfront : 1.19 ± 0.15 mV; Stand: 0.98 ± 0.14 mV). **C.** Amplitude des MEPs entre les conditions du groupe des jeunes (Back: 0.98 ± 0.12 mV; Front: 0.79 ± 0.09 mV; Rback: 1.04 ± 0.15 mV; Rfront: 1.08 ± 0.15 mV; Stand: 0.74 ± 0.11 mV). Une différence significative a été trouvée dans ce groupe entre certaines conditions (Back/Front: $p = 0.032$; Rfront/Stand: $p = 0.032$). Les astérisques (*) représentent le seuil de significativité à $p < 0.05$. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur standard de la moyenne.

Bien qu'aucun effet significatif au niveau de l'interaction (Groupes x Conditions) n'ait été trouvé, une analyse plus détaillée des différences entre toutes les conditions dans chacun des deux groupes a été effectuée. Celle-ci a permis d'observer dans le groupe des personnes âgées un effet principal entre les conditions de : $F(4, 56) = 3.82$, $p = 0.008$, $\eta^2 = 0.03$. A première vue, la différence entre les conditions dans le groupe de personnes âgées était significative, mais après les corrections appliquées par les tests *post-hoc*, aucune différence significative n'a été observée entre les conditions dans ce groupe (voir Figure 5B). Par contre, les résultats

trouvés dans le groupe des jeunes ont révélé un effet principal entre les conditions de: $F(1.95, 27.3) = 4.54, p = 0.021, \eta^2 = 0.08$. La différence entre certaines conditions dans ce groupe est donc significative. Grâce aux tests *post-hoc*, un effet significatif est visible uniquement entre les conditions Back/Front ($p = 0.032$) ainsi qu'entre les conditions Rfront/Stand ($p = 0.032$; voir Figure 5C).

6.3 Résultats du TA

6.3.1 SICI. Concernant l'analyse de la SICI des sujets au niveau du muscle TA de la jambe droite, l'ANOVA entre le groupe des personnes âgées ($44.75 \pm 4.9 \%$) et le groupe des jeunes ($42.42 \pm 7.64 \%$) n'a pas révélé de différence significative avec un effet principal entre les deux groupes de: $F(1, 28) = 0.1, p = 0.75, \eta^2 = 0.002$.

Toutefois, avec un effet principal entre les conditions de: $F(2.87, 80.26) = 3.48, p = 0.021, \eta^2 = 0.04$, un effet significatif a été observé. Les tests *post-hoc* ont révélé une différence significative uniquement entre les conditions Rback/Stand ($p = 0.046$; voir Figure 6).

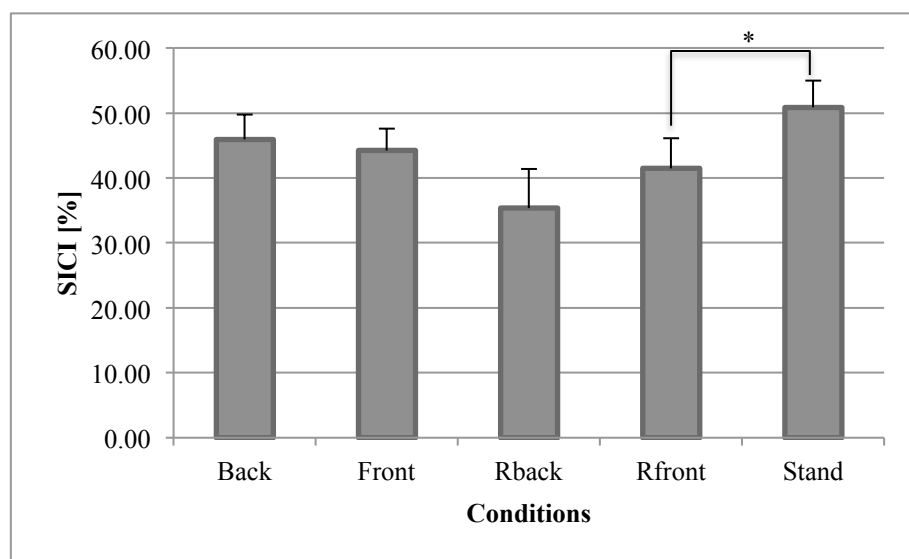


Figure 6. Pourcentage de l'inhibition intracorticale à court intervalle (SICI) au niveau du tibialis anterior (TA) entre les cinq conditions (Back: $45.96 \pm 3.78 \%$; Front: $44.24 \pm 3.34 \%$; Rback: $35.36 \pm 6.03 \%$; Rfront: $41.48 \pm 4.64 \%$; Stand: $50.87 \pm 4.15 \%$; Effet principal entre les conditions, $p = 0.021$). Un effet significatif est trouvé entre deux conditions (Rback/Stand: $p = 0.046$). L'astérisque (*) représente le seuil de significativité à $p < 0.05$. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur standard de la moyenne.

Avec une interaction (Groupes x Conditions) de: $F(2.87, 80.26) = 0.64, p = 0.582, \eta^2 = 0.008$, aucun effet significatif n'a été trouvé au niveau de l'interaction entre les deux groupes et les cinq conditions (voir *Figure 7*).

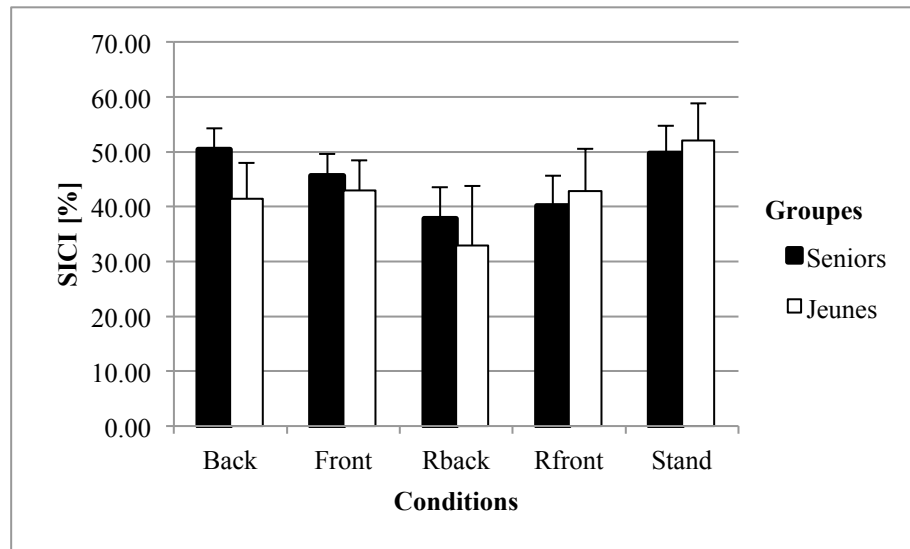


Figure 7. Pourcentage de l'inhibition intracorticale à court intervalle (SICI) pour les groupes et les conditions au niveau du tibialis anterior (TA). Aucun effet significatif n'est observable au niveau de cette interaction (Seniors/Back: 50.45 ± 3.84 %; Jeunes/Back: 41.47 ± 6.45 %; Seniors/Front: 45.57 ± 3.97 %; Jeunes/Front: 42.91 ± 5.51 %; Seniors/Rback: 37.84 ± 5.72 %; Jeunes/Rback: 32.88 ± 10.83 %; Seniors/Rfront: 40.15 ± 5.44 %; Jeunes/Rfront: 42.8 ± 7.71 %; Seniors/Stand: 49.72 ± 4.98 %; Jeunes/Stand: 52.02 ± 6.8 %; Effet principal de l'interaction entre les groupes et les conditions, $p = 0.582$). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'analyse des différences entre les conditions dans chaque groupe individuellement a montré un effet principal entre les conditions dans le groupe des seniors de : $F(4, 56) = 3.26, p = 0.018, \eta^2 = 0.07$. Un effet significatif a tout d'abord été trouvé entre les conditions de ce groupe, néanmoins, après les tests *post-hoc*, rien de significatif n'a été observé. De plus, l'effet principal entre les conditions dans le groupe jeune étant de : $F(2.57, 36.06) = 1.65, p = 0.201, \eta^2 = 0.04$, aucune différence significative n'a également été trouvée dans ce groupe.

6.3.2 MEP. L'ANOVA entre le groupe de personnes âgées (2.23 ± 0.44 mV) et le groupe de jeunes (1.40 ± 0.24 mV) n'a pas montré de différences significatives au niveau de l'excitabilité cortico-spinale des sujets concernant le muscle TA de la jambe droite, avec un effet principal entre les deux groupes de: $F(1, 28) = 3.05, p = 0.091, \eta^2 = 0.09$.

Toutefois, un effet significatif entre les cinq conditions a été observé, avec un effet principal entre les conditions de: $F(1.85, 51.87) = 9.16$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.04$. L'excitabilité cortico-spinale entre les conditions est donc différente et grâce aux tests *post-hoc*, il est possible de voir que les différences significatives se situent entre les conditions Back/Rfront ($p = 0.047$), Back/Stand ($p < 0.001$), Front/Rfront ($p = 0.032$), Front/Stand ($p = 0.003$), Rback/Stand ($p < 0.001$) et Rfront/Stand ($p = 0.002$; voir *Figure 8*).

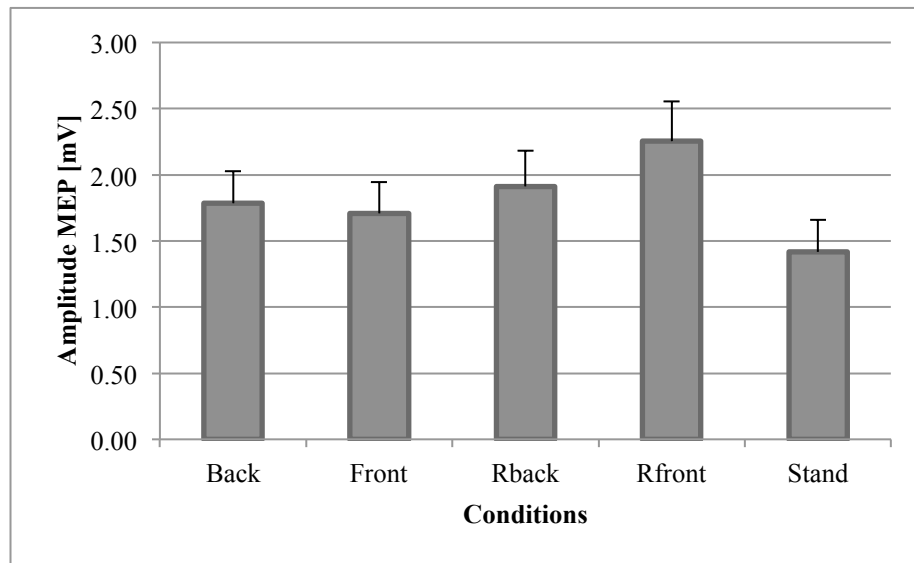


Figure 8. Amplitude (en millivolt) des potentiels évoqués moteurs (MEPs) au niveau du tibialis anterior (TA) entre les cinq conditions (Back: 1.79 ± 0.25 mV; Front: 1.71 ± 0.24 mV; Rback: 1.91 ± 0.27 mV; Rfront: 2.25 ± 0.3 mV; Stand: 1.42 ± 0.24 mV; Effet principal entre les conditions, $p < 0.001$). Un effet significatif a été trouvé entre plusieurs conditions (Back/Rfront: $p = 0.047$; Back/Stand: $p < 0.001$; Front/Rfront: $p = 0.032$; Front/Stand: $p = 0.003$; Rback/Stand: $p < 0.001$; Rfront/Stand: $p = 0.002$). Les différences significatives entre les barres n'ont pas été représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Avec un effet principal de l'interaction (Groupes x Conditions) de: $F(1.85, 51.87) = 3.11$, $p = 0.057$, $\eta^2 = 0.01$, aucun effet significatif n'a été observé au niveau de l'excitabilité cortico-spinale (voir *Figure 9A*).

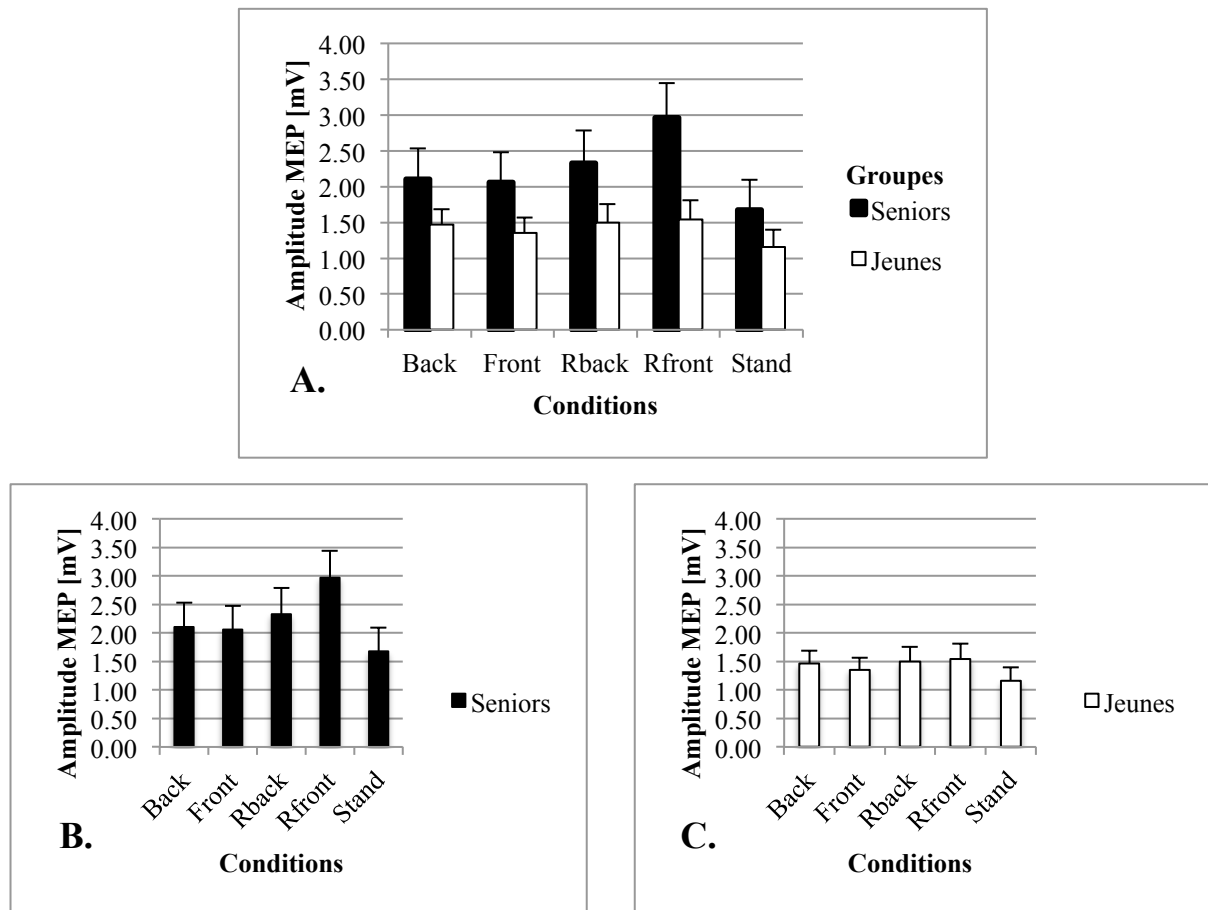


Figure 9. **A.** Amplitude (en millivolt) des potentiels évoqués moteurs (MEPs) de l'interaction entre les groupes et les conditions au niveau du tibialis anterior (TA). Les résultats n'indiquent aucun effet significatif au niveau de cette interaction ($p = 0.057$). **B.** Amplitude des MEPs entre les conditions dans le groupe des seniors (Back: 2.10 ± 0.43 mV; Front: 2.06 ± 0.42 mV; Rback: 2.33 ± 0.46 mV; Rfront: 2.97 ± 0.48 mV; Stand: 1.67 ± 0.42 mV). Un effet significatif est visible dans ce groupe entre plusieurs conditions (Back/Rfront: $p = 0.042$; Back/Stand: $p = 0.01$; Front/Rfront: $p = 0.042$; Front/Stand: $p = 0.01$; Rback/Stand: $p = 0.002$; Rfront/Stand: $p = 0.01$). Les différences significatives entre les barres n'ont pas été représentées. **C.** Amplitude des MEPs entre les conditions dans le groupe des jeunes (Back: 1.47 ± 0.22 mV; Front: 1.36 ± 0.21 mV; Rback: 1.50 ± 0.26 mV; Rfront: 1.54 ± 0.27 mV; Stand: 1.16 ± 0.24 mV). Rien de significatif n'a été observé. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Une analyse plus poussée des différences entre toutes les conditions dans chacun des deux groupes a montré dans le groupe des jeunes un effet principal entre les conditions de : $F(1.63, 22.77) = 1.91$, $p = 0.176$, $\eta^2 = 0.02$. La différence entre les conditions dans le groupe des jeunes n'est donc pas significative (voir Figure 9C). Par contre, le résultat trouvé dans le groupe des personnes âgées a montré un effet principal entre les conditions de : $F(1.47, 20.55) = 7.94$, $p = 0.005$, $\eta^2 = 0.06$. La différence entre les conditions dans le groupe des seniors est alors significative. Les tests *post-hoc* ont indiqué un effet significatif

uniquement entre les conditions Back/Rfront ($p = 0.042$), Back/Stand ($p = 0.01$), Front/Rfront ($p = 0.042$), Front/Stand ($p = 0.01$), Rback/Stand ($p = 0.002$) et Rfront/Stand ($p = 0.01$; voir *Figure 9B*).

7 Discussion

L'objectif de cette étude était de répondre à deux questions de recherche, consistant à montrer si l'âge des participants avait un effet sur l'équilibre dynamique au niveau du contrôle neuronal et à analyser si une action anticipée ou non pouvait avoir de l'influence sur l'activité des circuits inhibiteurs intracorticaux de types GABAergiques. Notre première hypothèse était qu'une plus petite SICI serait observée chez les jeunes que chez les personnes âgées durant des exercices d'équilibre dynamique. De plus, nous avons émis l'hypothèse qu'une plus grande taille des MEPs tests serait trouvée chez les seniors que chez les jeunes. Nous pensions également que le fait qu'une action puisse être anticipée ou non pouvait changer la valeur des résultats obtenus au niveau de la SICI et du MEP des muscles analysés.

7.1 Influence de l'âge sur la SICI et le MEP au niveau du SOL?

Cette étude n'a démontré aucun effet significatif au niveau de la SICI du muscle SOL ni entre les groupes, ni entre les conditions et ni au niveau de l'interaction entre les groupes et les conditions. Pour la SICI, il n'y a donc aucune distinction entre les jeunes et les personnes âgées au niveau des cinq conditions analysées. Les légères différences observées sur la *Figure 3* sont donc dues au hasard. Dans une de leurs études, Papegaaij, Taube et collègues (2016) n'ont également trouvé aucune différence significative entre les personnes âgées et les jeunes au niveau de l'ICI du SOL. Cela appuie les résultats obtenus dans notre étude. Dans l'étude de Papegaaij (2016), un ajustement des défis posturaux au niveau des compétences de chaque participant avait été établi. Dans notre étude, des paliers préparatoires ont été effectués avant de commencer avec la TMS afin d'adapter le niveau des perturbations à chaque participant. Nous avons pu constater que, dans les deux études, un ajustement a été effectué pour chaque participant afin qu'il se sente à l'aise lors des exercices. Le fait d'utiliser exactement le même protocole avec le même niveau de perturbation, sans ajustement, pour tous les participants, jeunes et plus âgés, aurait peut-être donné des résultats différents.

De plus, notre expérience a démontré que le fait qu'une action puisse être anticipée ou non n'influence pas les résultats de la SICI dans ce muscle.

En ce qui concerne le MEP du SOL, l'effet principal entre le groupe des seniors et le groupe des jeunes n'a pas montré non plus de différence significative. Néanmoins, un effet significatif a été observé entre les conditions Back/Front, Back/Stand, Rback/Stand, Rfront/Stand et Front/Rfront. La différence obtenue entre les conditions Back/Front pourrait

être expliquée par le fait que le SOL n'a pas la même activité si le sujet part vers l'avant et se retrouve sur la pointe des pieds ou s'il est propulsé vers l'arrière et déséquilibré sur les talons (pour plus d'informations, se rendre au chapitre 7.3 *Différences observées entre le SOL et le TA*). Pour les autres différences observées dans ce muscle au niveau du MEP, nous constatons qu'il y a un effet significatif entre la condition Stand et toutes les autres conditions sauf la condition Front. Cette différence entre la condition Stand et les autres pourrait être expliquée par le fait que, lors de l'expérience, la condition Stand se démarquait des autres conditions car elle ne demandait aucun effort et était la plus facile de toutes. Lors de la condition Front, les sujets ayant l'avantage de pouvoir se servir de leurs orteils afin de contrer le déséquilibre, ont certainement pu se préparer à la perturbation vers l'avant. Cette condition pourrait être estimée légèrement plus difficile que la condition Stand mais resterait tout de même relativement facile. Cela pourrait expliquer le fait que nous ne voyons pas de différence entre les deux conditions Stand et Front, les participants ayant probablement eu moins de peine que dans les autres conditions à garder l'équilibre. Finalement, la différence entre les conditions Front/Rfront nous montre que nous pouvons tout de même voir une différence entre la condition que nous pouvons anticiper (Front) et celle que nous ne pouvons pas anticiper (Rfront). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions Back/Rback ce qui nous incite à penser que selon la direction de la plateforme et donc du sujet, l'anticipation peut avoir un effet sur les résultats.

Par contre, l'effet de l'interaction (Groupes x Conditions) entre les groupes et les conditions n'a indiqué aucun effet significatif. Des recherches plus approfondies ont permis de découvrir des différences uniquement dans le groupe des jeunes entre les conditions Back/Front ainsi que Rfront/Stand. Les différences entre les conditions dans le groupe des personnes âgées n'ont quant à elles pas montré d'effet significatif. Nous pourrions émettre l'hypothèse que les jeunes arrivent mieux à contrôler et à gérer les différentes perturbations que le groupe des personnes âgées. Les deux générations n'ont certainement pas les mêmes stratégies pour se maintenir en équilibre. Les seniors, ayant une plus faible activité musculaire que les jeunes, ont certainement dû fournir le même niveau de concentration pour tous les mouvements de la plateforme et n'ont probablement pas ressenti de grosses différences entre les cinq conditions d'exercices. Quant aux jeunes, ils ont probablement vite compris qu'il était plus facile de compenser certains mouvements de la plateforme, ce qui expliquerait les quelques différences entre les conditions dans ce groupe.

Par conséquent, le seul effet significatif retrouvé au niveau du SOL se situe donc uniquement au niveau du MEP, entre certaines conditions. Par ailleurs, aucun résultat n'a montré de différence significative mise à part la différence entre quelques conditions dans le groupe des jeunes.

7.2 Influence de l'âge sur la SICI et le MEP au niveau du TA?

Lors de l'analyse du muscle TA au niveau de la SICI, nous n'avons également trouvé aucun effet significatif entre les deux groupes. Néanmoins, nous avons pu constater une différence significative uniquement entre les conditions Rback/Stand. Cette différence pourrait être expliquée par le fait que les conditions Rback et Stand pourraient être considérées comme les deux conditions les plus opposées de l'expérience. La condition Stand pourrait être considérée comme la plus simple alors que la condition Rback pourrait être considérée comme la plus complexe étant donné que les participants, à pieds nus, ne savaient pas qu'ils allaient partir vers l'arrière et que, dans ce sens, ils n'ont pas la possibilité d'utiliser leurs orteils afin de contrer les effets du déséquilibre.

L'effet de l'interaction (Groupes x Conditions) n'a montré, comme au niveau du SOL, aucun effet significatif entre les groupes et les conditions. Après des recherches plus approfondies, les différences entre les conditions analysées dans chacun des deux groupes n'ont également démontré aucune modulation significative.

Concernant le MEP du TA, l'effet principal entre les groupes n'a rien révélé de significatif. Par contre, nous avons observé une différence significative entre les conditions Front/Rfront, Back/Stand, Front/Stand, Rback/Stand, Rfront/Stand (voir *Figure 8*). Nous voyons donc qu'il y a une différence significative d'excitabilité cortico-spinale entre toutes les conditions et la condition Stand. Balanche expliquait dans son étude (2016) qu'en passant de la position assise à la position debout, l'excitabilité des voies motrices des muscles de la jambe augmentait significativement. Nous pourrions supposer, dans notre étude, qu'une augmentation de l'excitabilité se retrouve également lorsque les sujets passent d'une condition d'exercice facile, comme rester simplement debout, à des conditions plus difficiles, accompagnées de perturbations. Cela pourrait expliquer les différences trouvées entre les diverses conditions et la condition Stand. Comme nous l'avons également trouvé au niveau du SOL, il faut relever la différence entre les conditions Front/Rfront qui nous montre que lorsque la plateforme bouge vers l'arrière, le fait que le mouvement de la perturbation puisse

être anticipé influence les résultats obtenus. Ici encore, aucune différence entre les conditions Back et Rback n'est observée. Le fait que l'anticipation d'une action influence les valeurs des résultats selon la direction de la perturbation est alors confirmé.

Finalement, l'effet principal de l'interaction entre les groupes et les conditions n'a montré aucun effet significatif. Après un approfondissement de nos recherches, des différences significatives ont été observées entre les conditions uniquement dans le groupe de personnes âgées, mais pas dans celui des jeunes. En analysant plus en détails cette différence, nous la retrouvons entre les conditions Back/Rfront, Front/Rfront, Back/Stand, Front/Stand, Rback/Stand et Rfront/Stand (voir *Figure 9B*). Il est possible que les sujets plus âgés aient des stratégies similaires à celles des jeunes lorsqu'il est question d'une tâche d'équilibre qui n'est pas trop difficile; mais que leur stratégie diffère lorsque les exercices d'équilibre se compliquent (Papegaaij, Baudry, et al., 2016; Papegaaij, Taube, Hogenhout, et al., 2014). Cela expliquerait qu'on retrouve une différence uniquement dans le groupe des seniors et pas dans le groupe des jeunes. Comme nous le voyons dans le chapitre suivant (*7.3 Différence observée entre le SOL et le TA*), le TA réagit essentiellement lorsque le sujet se positionne sur ses talons. Le TA des personnes âgées a certainement une plus grande modulation que celui des jeunes car lorsque le corps est projeté en arrière, l'être humain ne bénéficie pas des orteils qui peuvent aider au maintien de l'équilibre; les seniors arrivent peut-être moins à rester stables, l'exercice étant plus difficile pour eux.

Pour résumé, nous avons dans le TA une différence significative au niveau de la SICI uniquement entre deux conditions et au niveau du MEP, une différence significative entre plusieurs conditions. Après avoir effectué des analyses plus détaillées, nous avons trouvé des différences entre certaines conditions uniquement dans le groupe des personnes âgées.

7.3 Différences observées entre le SOL et le TA

Les muscles SOL et TA sont des muscles antagonistes qui n'ont pas la même fonction. Le SOL, muscle antigravitaire, permet au corps humain de tenir en équilibre en assurant la flexion plantaire du pied au niveau de la cheville (Brunetti, 2016; Drake, Mitchell, & Vogl, 2006, p. 589). Le TA joue également un rôle dans le maintien de l'équilibre, en permettant la dorsiflexion du pied au niveau de la cheville. Durant la marche, il assure également le soutien dynamique de l'arche plantaire médiale du pied (Brunetti, 2016; Drake, Mitchell, & Vogl, 2006, p. 598).

Comme on peut le constater au niveau de la *Figure 10*, ces deux muscles n'agissent pas lors des mêmes mouvements de pieds. Le SOL se contracte lorsque l'être humain monte sur la pointe des pieds alors que le TA réagit beaucoup plus lorsque l'humain se penche vers l'arrière et se retrouve sur les talons. Cela pourrait expliquer pourquoi le MEP du SOL diffère dans les conditions Back/Front, le muscle le plus utilisé n'étant pas le même dans la condition Back (TA) ou Front (SOL). Dans la condition Stand, les deux muscles (SOL et TA) sont sollicités. Le SOL est particulièrement important dans la condition Rfront, afin de maintenir l'équilibre lors de la perturbation alors que dans la condition Rback, c'est le TA qui a le plus d'importance.

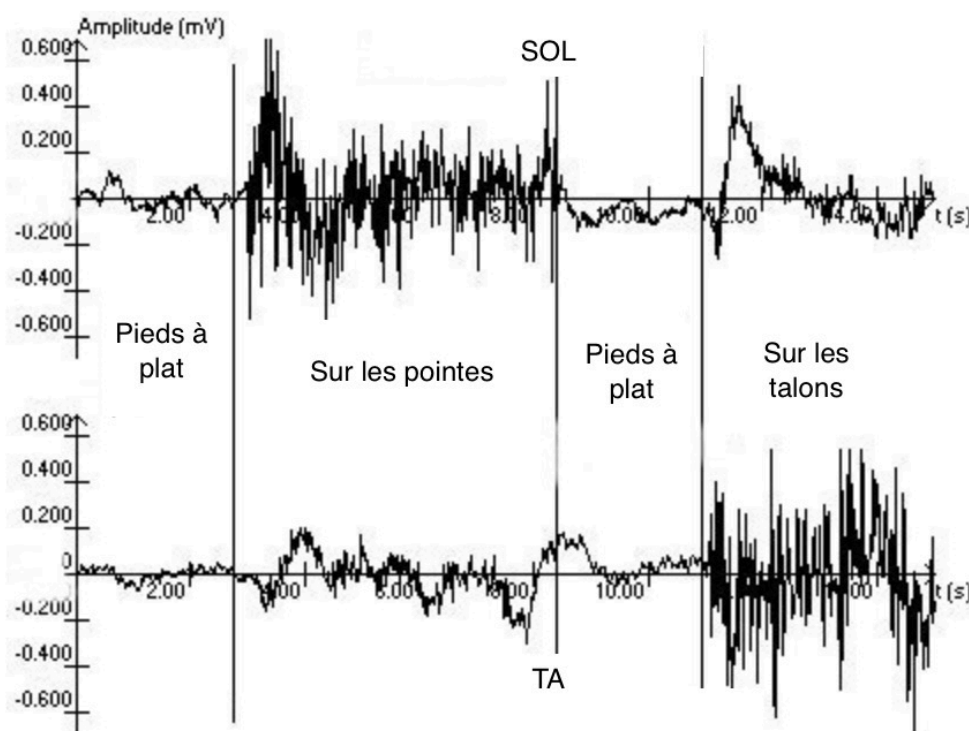


Figure 10. EMG des deux muscles antagonistes, le SOL et la TA lors d'un mouvement de flexion puis d'extension sur la jambe analysée. <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/emg2.htm>

Cette explication pourrait nous faire comprendre les légères différences que nous avons trouvées au niveau du MEP entre le TA et le SOL. Dans cette expérience, les amplitudes des MEPs étaient plus grandes au niveau du TA qu'au niveau du SOL. Le SOL ayant déjà une plus grande implication dans la position debout que le TA, a une moins grande possibilité de varier lors des différentes conditions (Balanche, 2016). Une autre explication pourrait être fournie par l'étude de Papegaaij et de ses collègues (2016) qui ont suggéré que la différence

observable entre le TA et le SOL serait attribuable au fait que les projections cortico-spinales du SOL sont plus faibles que celle du TA. Dans leur étude (2016), Papegaaij et collègues ont démontré que les résultats trouvés dans le SOL et le TA ne sont pas tous les mêmes. Dans notre étude, nous retrouvons plus ou moins les mêmes effets significatifs dans les deux muscles analysés. Mais il subsiste tout de même quelques différences. En conclusion, nous pouvons déduire que cela pourrait signifier que les changements liés à l'âge sont partiellement spécifiques aux muscles analysés (Papegaaij, Baudry, et al., 2016).

7.4 Influence de l'anticipation d'une action sur les résultats entre le groupe des jeunes et celui des seniors au niveau du SOL et du TA?

Cette étude n'a montré aucune différence significative entre les conditions Rback/Back ni au niveau du SOL, ni au niveau du TA. Par contre, une différence significative entre les conditions Front/Rfront a été observée au niveau du MEP dans les deux muscles analysés. Dans ce cas, le fait qu'une action soit anticipée ou non n'a pas influencé les résultats obtenus lorsque la plateforme bougeait vers l'avant, par contre, les résultats ont été influencés lorsque celle-ci se déplaçait vers l'arrière. La condition Back étant très difficile, qu'elle soit anticipée ou non n'a pas provoqué de modulation chez les sujets de cette étude, ce qui expliquerait le fait que nous ne retrouvons pas de différences significatives entre les conditions Back/Rback. Nous pouvons conclure que l'influence de l'anticipation sur les résultats dépend dans notre étude de la direction de la perturbation.

Il faut prendre en compte le fait que lors de notre expérience, les sujets ont pu tester les huit paliers de la plateforme et ont donc eu le temps de s'habituer progressivement à la perturbation. De même, tous les exercices ont été exécutés dans le même ordre et nous indiquions à chaque fois au participant le bloc d'exercices auquel il serait confronté. C'est-à-dire qu'avant de faire les 48 premières stimulations aléatoires, le sujet savait qu'il était dans la condition Random; il savait donc à quoi s'attendre. De plus, deux secondes avant la perturbation, un signal sonore retentissait pour avertir le sujet que la perturbation allait arriver. Dans son étude (2003), Patla indiquait que l'apport visuel joue un rôle principal dans le contrôle de l'anticipation et que ce contrôle peut être affecté par le fait que le sujet connaisse déjà la perturbation et l'ait déjà testée. Notre étude présente des similitudes avec l'étude de Patla: les sujets connaissaient et avaient pu expérimenter la perturbation avant de passer à l'expérience avec la TMS. Nous pouvons également supposer que l'indication sonore

avant la perturbation ait eu le même effet que l'apport visuel de l'expérience de Patla et ait ainsi permis aux sujets d'anticiper le mouvement de la plateforme.

7.5 Limites du travail

Tout d'abord, il faut savoir que les personnes du groupe seniors qui ont accepté de venir participer à l'étude étaient toutes en excellente santé, non-chuteurs et avaient principalement un taux d'activité physique élevé ou modéré (taux d'activité physique: sept élevés, cinq modérés et trois bas). Il est également important de relever que la majeure partie des personnes appartenant à ce groupe ont eu l'habitude d'effectuer des travaux relativement difficiles (vignes) dès leur plus jeune âge. Il est nécessaire de prendre en compte cela, car les tâches quotidiennes qu'ils ont exercées durant de nombreuses années ont pu renforcer inconsciemment leur équilibre.

Dans notre expérience, il aurait été intéressant de travailler avec plus de sujets appartenant à la catégorie d'activité physique basse, ainsi qu'avec des personnes ayant déjà chuté. Cela aurait certainement pu influencer les résultats.

De plus, les sujets du groupe des jeunes faisaient majoritairement partie de la catégorie des personnes ayant une activité physique élevée ou modérée (taux d'activité physique: sept élevés, six modérés et trois bas). Treize sujets sur 18 faisaient l'université en sciences du mouvement et du sport et étaient donc de très bons sportifs. Il aurait été préférable de prendre des personnes avec des taux d'activité physique plus variés, ainsi que davantage de sujets effectuant une activité physique basse.

Ensuite, lorsque la perturbation pouvait être anticipée, tous les sujets utilisaient des techniques différentes comme plier les genoux, se pencher en avant ou utilisaient leurs bras afin de contrer le déséquilibre à venir. Bien que nous leur ayons mis à disposition un écran qui montrait la contraction de leurs muscles (feedback visuel) afin qu'ils essaient de ne pas anticiper musculairement la perturbation, nous n'avons malheureusement pas réussi à contrôler toutes les anticipations.

Il faut également noter que certains sujets, jeunes et plus âgés, ont choisi d'enlever leurs lunettes optiques lors de l'expérience avec la TMS, car le casque qui était fixé sur leur tête appuyait sur leurs lunettes et les dérangeait. Comme nous l'avons déjà relevé au début de ce

travail, le système visuel joue un grand rôle dans le maintien de l'équilibre car il permet à l'être humain de prendre conscience du mouvement de chaque partie de son corps ainsi que de se construire une carte visuelle de l'espace qui l'entoure (Brunetti, 2016; Le Goïc, 2013; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, & White, 2015, p.259). Cela pourrait avoir perturbé les résultats, en empêchant aux sujets, ayant une visibilité altérée, de fixer un point afin de garder l'équilibre.

Par ailleurs, l'expérience de cette étude prenait deux à trois heures par personnes et les sujets devaient rester debout la plupart du temps. Les personnes âgées, venant principalement par groupes de trois ou de quatre, passaient à peu près la journée dans le laboratoire. Ce fut donc de longues journées pour elles; elles étaient fatiguées et souvent, anxieuses de ne pas tomber lorsque la plateforme se déplaçait. Lors des exercices avec la TMS sur la plateforme, la plupart des seniors ont ainsi préféré garder une main vers la barrière de sécurité placée contre le mur à côté de la plateforme afin de ne pas tomber lors de la perturbation, certains ont même fait le choix de tenir la barrière tout au long de cette expérience. Le réflexe de saisir quelque chose de stable est une stratégie de rééquilibration et permet de ne pas chuter lors de perturbations (Le Goïc, 2013). Cela a probablement pu modifier les résultats trouvés dans les deux muscles car moins de mouvements et moins de déplacements de pieds ont pu être observés.

Finalement, les données des participants ont été prises pour trois expériences. En raison de l'influence de la fatigue et de la pénibilité de l'expérience, les impulsions appliquées sur la tête des participants n'étant pas agréables, certains sujets ont décidé de faire une pause entre les conditions. La TMS venant en dernière position et étant l'exercice le plus pénible, il aurait fallu commencer par ce point afin d'éviter les effets de la fatigue.

8 Conclusion et perspectives de nouvelles questions de recherche

La présente étude a été la première à se focaliser sur l'impact de l'âge au niveau du contrôle neuronal sur des exercices d'équilibre dynamique. La TMS à impulsion unique a permis de mesurer le MEP alors que la TMS à double impulsion a permis de mesurer la SICI des sujets. Cette étude n'a malheureusement pas montré de différences significatives entre les deux générations étudiées ni au niveau de la SICI, ni au niveau du MEP dans les deux muscles analysés, le SOL et le TA. L'âge des participants n'a donc pas eu d'effet sur l'équilibre dynamique au niveau du contrôle neuronal. Cela a donc réfuté les hypothèses qui suggéraient que nous allions trouver une plus petite SICI chez les jeunes que chez les personnes âgées ainsi qu'un plus grand MEP dans le groupe des seniors que dans le groupe des jeunes.

Nous avons pu observer une différence significative entre certaines conditions au niveau de la SICI et du MEP dans le SOL ainsi qu'au niveau du MEP dans le TA. Des modulations entre certaines conditions se retrouvaient au niveau du MEP dans les deux muscles analysés, néanmoins, certaines conditions étaient tout de même différentes. Bien qu'aucun effet significatif de l'interaction (Groupes x Conditions) n'ait été observé dans les deux muscles, des modulations ont été trouvées entre certaines conditions uniquement dans le groupe des jeunes en ce qui concerne le SOL, par contre, pour le TA, certaines différences entre les conditions étaient visibles uniquement dans le groupe des seniors.

Finalement, l'hypothèse selon laquelle le fait qu'une action puisse être anticipée ou non changerait la valeur des résultats obtenus a été partiellement acceptée. Cette étude nous a démontré que selon la direction de la perturbation, une différence significative pouvait être observée entre les conditions permettant une anticipation et les autres.

L'expérience effectuée dans la présente étude utilisait une plateforme qui bougeait en créant uniquement des perturbations postéro-antérieures et antéro-postérieures, mais nous ne nous sommes pas intéressés aux mouvements latéraux du côté droit et du côté gauche. Cela aurait pu influencer les résultats car certains chercheurs ont trouvé qu'une grande proportion de chute chez les personnes âgées était due à un mouvement latéral qui demande une coordination plus complexe des réponses au niveau des muscles (Allum, Carpenter, Honegger, Adkin, & Bloem, 2002). De plus, comme l'être humain se déplace vers l'avant, il est plus probable qu'il réussisse à éviter les perturbations qui vont dans ce sens car il y fait face dans la vie de tous les jours, comme par exemple, dans un bus lors d'un freinage brusque ou également à l'entrée ou à la sortie d'un tapis roulant dans les centres commerciaux.

En conclusion, il serait également intéressant de voir si une corrélation pourrait être faite entre les résultats trouvés lors d'exercices d'équilibre statique et ceux observés lors d'exercices d'équilibre dynamique pour chaque personne analysée.

9 Bibliographie

- Abbruzzese, G., Assini, A., Buccolieri, A., Schieppati, M., & Trompetto, C. (1999). Comparison of intracortical inhibition and facilitation in distal and proximal arm muscles in humans. *The Journal of Physiology*, 514, 895-903. doi:10.1111/j.1469-7793.1999.895ad.x
- Allum, J. H. J., Carpenter, M. G., Honegger, F., Adkin, A. L., & Bloem, B. R. (2002). Age-dependent variations in the directional sensitivity of balance corrections and compensatory arm movements in man. *The Journal of Physiology*, 542, 643-663. doi:10.1113/jphysiol.2001.015644
- Balanche, C. (2016). *La modification de la perception de la hauteur et l'influence de la difficulté de la tâche sur le contrôle de la posture et les mécanismes d'inhibition intracorticaux*. (Thèse de Master, Université de Fribourg, Suisse). Accès à l'adresse http://doc.rero.ch/record/277562/files/Masterarbeit_Balanche_Camille.pdf?version=1
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the royal statistical society. Series B: Methodological*, 57, 289-300. Accès à l'adresse <http://www.jstor.org/stable/pdf/2346101.pdf>
- Bouisset, S., & Maton, B. (1995). Muscles, posture et mouvement. *Bases et applications de la méthode électromyographique*. Paris, France: Hermann.
- Brunetti, L. (2016). *L'influence de l'observation et de l'imagination motrice de tâche d'équilibre sur les mécanismes d'inhibition*. (Thèse de Master, Université de Fribourg, Suisse). Accès à l'adresse http://doc.rero.ch/record/277553/files/Masterarbeit_Brunetti_Loic.pdf
- Chen, R., Tam, A., Bütefisch, C., Corwell, B., Ziemann, U., Rothwell, J. C., & Cohen, L. G. (1998). Intracortical Inhibition and Facilitation in Different Representations of the Human Motor Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 80(6), 2870-2881.
- Connors, B. W., Malenka, R. C., & Silva, L. R. (1988). Two inhibitory postsynaptic potentials, and GABAA and GABAB receptor-mediated responses in neocortex of rat and cat. *The Journal of Physiology*, 406, 443-468.

- Daskalakis, Z. J., Christensen, B. K., Fitzgerald, P. B., Roshan, L., & Chen, R. (2002). The mechanisms of interhemispheric inhibition in the human motor cortex. *The Journal of Physiology*, 543(1), 317–326. doi:10.1113/jphysiol.2002.017673
- Di Lazzaro, V., Pilato, F., Dileone, M., Ranieri, F., Ricci, V., Profice, P., ... Ziemann, U. (2006). GABAA receptor subtype specific enhancement of inhibition in human motor cortex. *Journal of Physiology*, 575, 721–726. doi:10.1113/jphysiol.2006.114694
- Di Lazzaro, V., & Rothwell, J. C. (2014). Corticospinal activity evoked and modulated by non-invasive stimulation of the intact human motor cortex. *Journal of Physiology*, 592, 4115–4128. doi:10.1113/jphysiol.2014.274316
- Di Lazzaro, V., & Ziemann, U. (2013). The contribution of transcranial magnetic stimulation in the functional evaluation of microcircuits in human motor cortex. *Frontiers in Neural Circuits*, 7. doi:10.3389/fncir.2013.00018
- Drake, R.L., Mitchell, A.W.G., & Vogl, A.W. (2006) *Gray's Anatomie pour les étudiants* (2^e éd.). France: Elsevier Masson.
- Gallimard (2001). *VU Corps Humain: Encyclopédie visuelle du corps humain*
- Heise, K.-F., Zimmerman, M., Hoppe, J., Gerloff, C., Wegscheider, K., & Hummel, F. C. (2013). The Aging Motor System as a Model for Plastic Changes of GABA-Mediated Intracortical Inhibition and Their Behavioral Relevance. *The Journal of Neuroscience*, 33(21), 9039–9049. doi:10.1523/JNEUROSCI.4094-12.2013
- Ilić, T. V., Meintzschel, F., Cleff, U., Ruge, D., Kessler, K. R., & Ziemann, U. (2002). Short-interval paired-pulse inhibition and facilitation of human motor cortex: the dimension of stimulus intensity. *The Journal of Physiology*, 545, 153–167. doi:10.1113/jphysiol.2002.030122
- Kobayashi, M., & Pascual-Leone, A. (2003). Transcranial magnetic stimulation in neurology. *The Lancet Neurology*, 2(3), 145–156. doi:10.1016/S1474-4422(03)00321-1
- Konrad, P. (2005). The ABC of EMG. *A practical introduction to kinesiological electromyography*, 1.
- Kossev, A. R., Schrader, C., Däuper, J., Dengler, R., & Rollnik, J. D. (2002). Increased intracortical inhibition in middle-aged humans; a study using paired-pulse transcranial magnetic stimulation. *Neuroscience Letters*, 333(2), 83–86. doi:10.1016/S0304-3940(02)00986-2

- Kujirai, T., Caramia, M. D., Rothwell, J. C., Day, B. L., Thompson, P. D., Ferbert, A., Wroe, S., Asselman, P., & Marsden, C. D. (1993). Corticocortical inhibition in human motor cortex. *The Journal of Physiology*, 471, 501-519.
- Lazzaro, V. D., Restuccia, D., Oliviero, A., Profice, P., Ferrara, L., Insola, A., ... Rothwell, J. C. (1998). Magnetic transcranial stimulation at intensities below active motor threshold activates intracortical inhibitory circuits. *Experimental Brain Research*, 119(2), 265-268. doi:10.1007/s002210050341
- Le Goïc, M. (2013). *Etude du contrôle postural chez l'homme : analyse des facteurs neurophysiologiques, biomécaniques et cognitifs, impliqués dans les 500 premières millisecondes d'une chute*. (Thèse de doctorat, Université René Descartes, France). Accès à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01002633/document>
- McGinley, M., Hoffman, R. L., Russ, D. W., Thomas, J. S., & Clark, B. C. (2010). Older adults exhibit more intracortical inhibition and less intracortical facilitation than young adults. *Experimental gerontology*, 45(9), 671-678. doi:10.1016/j.exger. 2010. 04.005
- Mouzat, A., Dabonneville, M., Roux, D., Borges, N., & Bertrand, P. (s. d.). Position des pieds et paramètres stabilométriques. *Staps*, no 67(1), 59-71.
- Oliveri, M., Caltagirone, C., Filippi, M. M., Traversa, R., Cicinelli, P., Pasqualetti, P., & Rossini, P. M. (2000). Paired transcranial magnetic stimulation protocols reveal a pattern of inhibition and facilitation in the human parietal cortex. *The Journal of Physiology*, 529, 461-468. doi:10.1111/j.1469-7793.2000.00461.x
- Orth, M., Snijders, A. H., & Rothwell, J. C. (2003). The variability of intracortical inhibition and facilitation. *Clinical Neurophysiology*, 114(12), 2362-2369. doi:10.1016/S1388-2457(03)00243-8
- Papegaaij, S., Baudry, S., Négyesi, J., Taube, W., & Hortobágyi, T. (2016). Intracortical inhibition in the soleus muscle is reduced during the control of upright standing in both young and old adults. *European Journal of Applied Physiology*, 116, 959-967. doi:10.1007/s00421-016-3354-6
- Papegaaij, S., Taube, W., Baudry, S., Otten, E., & Hortobágyi, T. (2014). Aging causes a reorganization of cortical and spinal control of posture. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6. doi:10.3389/fnagi.2014.00028

- Papegaaij, S., Taube, W., Hogenhout, M., Baudry, S., & Hortobágyi, T. (2014). Age-related decrease in motor cortical inhibition during standing under different sensory conditions. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6(126), 1-8. doi:10.3389/fnagi.2014.00126
- Papegaaij, S., Taube, W., van Keeken, H. G., Otten, E., Baudry, S., & Hortobágyi, T. (2016). Postural challenge affects motor cortical activity in young and old adults. *Experimental Gerontology*, 73, 78-85. doi:10.1016/j.exger.2015.11.015
- Patla, A.E. (2003). Strategies for dynamic stability during adaptive human locomotion. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 22, 48-52.
- Petersen, T. H., Rosenberg, K., Petersen, N. C., & Nielsen, J. B. (2009). Cortical involvement in anticipatory postural reactions in man. *Experimental Brain Research*, 193(2), 161. doi:10.1007/s00221-008-1603-6
- Peurala, S. H., Müller-Dahlhaus, J. F. M., Arai, N., & Ziemann, U. (2008). Interference of short-interval intracortical inhibition (SICI) and short-interval intracortical facilitation (SICF). *Clinical Neurophysiology*, 119(10), 2291-2297. doi:10.1016/j.clinph.2008.05.031
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., Lamantia, A. S., McNamara, J. O., & Williams, S. M. (2005). *Neurosciences* (3^e éd.). Bruxelles, Belgique: De Boeck.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., Lamantia, A. S., & White, L.E. (2015). *Neurosciences* (5^e éd.). Louvain-la-Neuve, Belgique: De Boeck Supérieur.
- Reece, J., Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P., & Jackson, R. (2012). *Campbell biologie* (9^e éd.). France: Pearson.
- Rigoard, S., Wager, M., Buffenoir, K., Bauche, S., Giot, J. P., Maixent, J. M., & Rigoard, P. (2009). Principaux mécanismes impliqués dans la transmission synaptique au sein de l'appareil neuromusculaire. *Neurochirurgie*, 55, 22-33.
- Rotenberg, A., Horvath, J. C., & Pascual-Leone, A. (2014). *Transcranial magnetic stimulation*. New York: Springer.
- Rousseu, C., & Crémieux, J. (s. d.). Perception de l'orientation visuelle chez des experts en taekwondo. *Staps*, 65(3), 79-86.

- Sanger, T. D., Garg, R. R., & Chen, R. (2001). Interactions between two different inhibitory systems in the human motor cortex. *The Journal of Physiology*, 530, 307-317. doi:10.1111/j.1469-7793.2001.03071.x
- Tortora, G., & Grabowski, B. (2014). *Principes d'anatomie et de physiologie* (2^e éd.). Québec, Canada : de Boeck.
- Valero-Cabré, A., Pascual-Leone, A., & Coubard, O. A. (2011). La stimulation magnétique transcrânienne (SMT) dans la recherche fondamentale et clinique en neuroscience. *Revue neurologique*, 167(4), 291-316. doi:10.1016/j.neurol.2010. 10.013
- Vander, A.J., Sherman, J.H., Luciano, D.S, Brière, R. (1995). *Physiologie humaine* (3^e éd.). Montréal, Canada: Les éditions de la Chenelière/McGraw-Hill
- Ziemann, U., Rothwell, J. C., & Ridding, M. C. (1996). Interaction between intracortical inhibition and facilitation in human motor cortex. *The Journal of Physiology*, 496, 873-881.

10 Annexes

10.1 Questionnaire sur le taux d'activité physique au quotidien (QAPPA)

Nous nous intéressons aux différents types d'activités physiques que vous faites dans votre vie quotidienne, même si vous ne vous considérez pas comme une personne active. Les questions concernent les sports, ainsi que les activités physiques que vous faites dans votre maison ou votre jardin, pour vos déplacements, pendant votre temps libre, et au travail.

ACTIVITES VIGOUREUSES

D'abord, pensez seulement aux activités physiques que vous avez pratiquées au cours des **7 DERNIERS JOURS** de manière **VIGOUREUSE**, c'est-à-dire, une activité physiquement difficile à réaliser et qui entraîne une importante augmentation du rythme cardiaque et respiratoire, comme par exemple, **FAIRE UN JOGGING**.

Cochez les activités que vous avez pratiquées, durant au moins 10 minutes sans arrêt, de manière VIGOUREUSE : Jogging , Vélo sportif , Tennis intense , Natation intense , Randonnée intense avec dénivelé , Jardinage intense , Gymnastique intense , Activités ménagères intenses (faire les vitres, déplacer des meubles lourds)

Autres (précisez) : _____

Pas d'activité physique vigoureuse sur les 7 derniers jours

Si vous n'avez fait aucune activité de manière vigoureuse, passez à la question I.2

Sur les **7 derniers jours**, si vous avez pratiqué **UNE** ou **PLUSIEURS** de ces activités de manière **VIGOUREUSE**, durant au moins **10 minutes** sans arrêt, indiquez pour chaque jour pendant combien de temps (en minutes) ?

Lundi |___| Mardi |___| Mercredi |___| Jeudi |___| Vendredi |___| Samedi |___| Dimanche |___|

ACTIVITES MODÉRÉES

Maintenant, pensez aux activités physiques que vous avez pratiquées au cours des **7 DERNIERS JOURS** de manière **MODEREE**, c'est-à-dire, une activité qui entraîne une légère augmentation du rythme cardiaque et respiratoire, comme par exemple **MARCHER**

VITE.

Cochez les activités que vous avez pratiquées, durant au moins 10 minutes sans arrêt, à une intensité MODÉRÉE : Marche rapide en terrain plat , Vélo modéré , Tennis modéré , Natation modérée , Marche modérée avec dénivelé , Jardinage , Gymnastique douce , Danse , Yoga , Aquagym , Activités ménagères modérées (passer l'aspirateur, la serpillière) ,

Autres (précisez) : _____

Pas d'activité physique modérée sur les 7 derniers jours

Sur les **7 derniers jours**, si vous avez pratiqué **UNE** ou **PLUSIEURS** de ces activités de manière **MODÉRÉE**, durant au moins **10 minutes** sans arrêt, indiquez pour chaque jour pendant combien de temps (en minutes) ?

Lundi |__| Mardi |__| Mercredi |__| Jeudi |__| Vendredi |__| Samedi |__| Dimanche |__|

10.2 Questionnaire sur le taux de chutes au quotidien

1) Nom : _____

2) Prénom : _____

3) Vivez-vous seul(e) ? oui ☐ non ☐

4) Utilisez vous une aide technique habituellement lors de vos déplacements ? oui ☐ non ☐

Si oui : canne ☐ béquille ☐ déambulateur ☐

5) Vous êtes vous retrouvé(e) au sol, avec conséquences physiques ? oui ☐ non ☐

6) Vous êtes vous retrouvé(e) au sol, sans conséquences physiques ? oui ☐ non ☐

7) Avez vous fait un malaise à votre domicile ? oui ☐ non ☐

8) Avez vous déjà chuté à votre domicile depuis que vous avez 65 ans ? oui ☐ non ☐

Si vous avez répondu oui à une des 4 dernières questions continuez le questionnaire sinon vous pouvez vous arrêter :

9) Combien de fois vous êtes vous retrouvé(e) au sol ? _____

10) Date et moment de(s) la chute(s) : _____

11) Lieu de(s) la chute(s) : _____

12) Avez vous été emmené(e) à l'hôpital ? oui ☐ non ☐

13) Avez vous perdu connaissance ? oui ☐ non ☐

14) La chute a-t-elle causé des traumatismes physiques ? oui ☐ non ☐ Si oui, les décrire :

15) Avez vous pu vous relever seul(e) ? oui ☐ non ☐

16) Combien de temps êtes vous resté(e) au sol sans pouvoir vous relever ?

17) Avez vous pu vous tenir debout sans aide après la chute ? oui ☐ non ☐

18) Si oui au 4) : l'aide technique était-elle utilisée au moment de la chute ? oui ☐ non ☐

19) Quelle était l'action en cours ? En se levant du lit ou en se couchant ☐ En se levant d'une chaise ou d'un fauteuil ou en s'asseyant ☐ En se déplaçant pour des activités diverses ☐ Pendant la toilette ☐ En se rendant au WC ou en revenant des toilettes ☐

Au cours de l'habillage ou du déshabillage ☐

À l'ouverture ou à la fermeture d'une porte ☐ Autre :

20) Un obstacle peut-il avoir été responsable de la chute ? oui ☐ non ☐ Si oui lequel :

21) Le sol était-il normal ☐ glissant ☐ collant ☐

22) L'éclairage était-il suffisant ? oui ☐ non ☐

23) Avez vous peur de faire une nouvelle chute ? oui ☐ non ☐ Si oui :

Est ce que cette peur vous contraint dans vos activités ? oui ☐ non ☐

Pensez vous à cette peur lorsque vous êtes à votre domicile ? jamais ☐ parfois ☐ souvent ☐

11 Remerciements

Tout d'abord je voudrais remercier Audrey Mouthon, co-conseillère pour ce travail, pour son aide et sa disponibilité durant toute la période de prises de mesures au laboratoire.

Je tiens aussi à remercier Yves-Alain Kuhn, également co-conseiller pour ce travail, pour son aide lors de l'analyse des résultats, sa disponibilité et pour la relecture lors de la rédaction de ce travail.

Je voudrais remercier ensuite toutes les personnes qui ont accepté de participer à cette expérience, les jeunes et les seniors. Mais un grand merci particulier aux personnes âgées qui se sont presque toutes déplacées du Valais jusqu'à Fribourg et qui m'ont consacré de leur temps.

Et pour finir, je remercie mes proches pour leur soutien et pour le temps qu'ils ont passé à la relecture de ce travail.

12 Déclaration personnelle

« Je sous-signée certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis mutandis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel. »

Lieu, date

Signature

13 Déclaration de cession des droits d'auteur

« Je sous-signée reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur – y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles – à l'Université de Fribourg.

La cession à tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord de la sous-signée uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière. »

Lieu, date :

Signature :