

# **L'influence de l'observation et de l'imagination motrice de tâche d'équilibre sur les mécanismes d'inhibition**

Master thesis in Sport Sciences and Motor Control  
University of Fribourg

**Brunetti Loïc**

Référent : Prof. Dr. Taube Wolfgang

Co-référent : Mouthon Audrey

Travail de Master pour l'obtention du titre de Master of Science

Unité « Science du Mouvement et du Sport »

Département de médecine

Université de Fribourg

Juillet 2016

# Table des matières

<b>Abréviations .....</b>	<b>4</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>6</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 L'équilibre .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 L'imagerie mentale et l'observation .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Mécanismes impliqués dans la simulation mentale.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Mécanismes impliqués dans la simulation mentale des tâches d'équilibre .....	14
<b>1.4 Formes d'imagerie impliquées dans la stimulation mentale .....</b>	<b>14</b>
1.4.1 Formes d'imagerie impliquées dans la simulation des tâches d'équilibre.....	16
<b>1.5 L'inhibition .....</b>	<b>16</b>
<b>1.6 Impacts de l'entraînement d'équilibre .....</b>	<b>17</b>
<b>2 Méthode.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Participants.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Test imagerie mentale.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Entraînement d'équilibre .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 TMS.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 EMG .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6 Traitement et analyse statistique des données .....</b>	<b>24</b>
<b>3 Résultats.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Résultats stabilomètre .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Différences entre les groupes au niveau de l'ECS.....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Gastrocnemius .....	27
3.2.2 Soleus.....	28
3.2.3 Tibialis anterior.....	29
<b>3.3 Différences entre les groupes au niveau du SICI .....</b>	<b>31</b>
3.3.1 Gastrocnemius .....	31
3.3.2 Soleus.....	32
3.3.3 Tibialis anterior.....	33
<b>4 Discussion et conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Résultats comportementaux .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 MEP : conditions mentales .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3 MEP : posture .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4 MEP : effets de l'entraînement.....</b>	<b>37</b>

4.5 MEP : différences entre les muscles .....	38
4.6 ICI.....	39
4.7 SICI : conditions mentales .....	40
4.8 SICI : posture .....	40
4.9 SICI : effets de l'entraînement .....	41
4.10 SICI : différences entre les muscles .....	42
Bibliographie .....	46
Remerciements .....	57
Déclaration personnelle.....	58
Déclaration de cession des droits d'auteur .....	59

## **Abréviations**

ADM	M. abductor digiti minimi
AO	Observation active
APB	Abductor pollicis brevis
CG	Groupe contrôle
ECS	Electrode au calomel saturée
EM	executed movements
EMG	Electromyogramme
GM	Gastrocnemius
H-Reflex	Hoffmann-Reflex
ICI	Intracortical inhibition
IM	Imagerie motrice
M1	cortex moteur primaire
MEP	Potentiel moteur évoqué
MVC	Contraction volontaire maximale
P	Posture dynamique
PMD	Cortex prémoteur dorsal
PMV	Cortex prémoteur ventral
PO	Observation passive
Pre	Pré-test
Post	Post-test
RMT	Seuil moteur de repos
S	Posture statique
SICI	Short-interval intracortical inhibition
SOL	Soleus

TA	Tibialis anterior
TG	Groupe entraînement
TMS	Stimulation magnétique transcrânienne

## Résumé

Une amélioration significative de l'équilibre au moyen de l'imagerie mentale et de l'observation a déjà été démontrée (Keller et al. 2014 ; Mouthon et al., 2015). Le fait que les parties du cerveau responsables du contrôle de l'équilibre soient activées et que l'excitation corticospinale augmente durant l'imagerie mentale et l'observation explique ce phénomène. L'implication des mécanismes inhibiteurs au cours de l'imagerie mentale et de l'observation reste cependant encore très incertaine. Cette étude vise à savoir si l'observation et l'imagerie mentale influencent l'inhibition intracorticale et si un entraînement d'équilibre entraîne une modulation de l'ECS et du SICI lors de la simulation mentale. Plus précisément, l'hypothèse émise est qu'il y aurait une augmentation de l'inhibition intracorticale lors d'une tâche d'équilibre facile et une diminution de celle-ci lors d'une tâche difficile d'équilibre. Dans cette optique, les mécanismes inhibiteurs seront évalués par une méthode neurophysiologique. Les sujets devaient regarder 2 vidéos comme dans un miroir : l'une avec une posture statique et l'autre avec une posture dynamique. En plus des postures, le sujet devait regarder chaque vidéo une fois passivement (PO) et une fois activement (IM + AO). Le design de l'étude consistait à envoyer au sujet 6 stimuli « control », suivi de 12 stimuli « condition » que le sujet recevait durant le visionnage des vidéos, et pour finir à nouveau 6 stimuli « control ». Ce schéma se répétait 8 fois avec une pause après 4 fois. Les réactions musculaires étaient enregistrées sur le soleus, le tibialis anterior et le gastrocnemius. Les résultats montrent que l'excitation corticospinale est la plus grande avec AO + IM. La posture dynamique (P) tend à avoir une facilitation plus grande que la posture statique (S). Il n'y a pas eu d'influence de l'entraînement physique d'équilibre sur l'excitation corticospinale. Pour l'inhibition intracorticale, les résultats ont montré une modulation significative du SICI par les conditions mentales et la posture. AO + IM ont montré une inhibition intracorticale moins grande que pour PO. De plus, les postures statiques donnent une inhibition plus importante que les postures dynamiques. L'entraînement a eu un effet significatif en augmentant l'inhibition dans le groupe contrôle, mais en diminuant l'inhibition du groupe entraînement. Cela montre que les différentes tâches et les conditions mentales durant l'imagerie mentale modulent d'une part l'excitation corticospinale et d'autre part l'inhibition intracorticale pendant les tâches d'équilibre.

# 1 Introduction

Il est avéré qu'un entraînement de l'équilibre par le biais de l'imagerie mentale ou de l'observation améliore de façon significative l'équilibre (Keller et al. 2014). Ce phénomène est observable à travers l'activation des régions du cerveau impliquées dans le contrôle de l'équilibre (Ouchi et al., 1999; Taube et al., 2015) ainsi que par l'augmentation de l'excitabilité du système corticospinal pendant l'observation et l'imagerie motrice des tâches posturales (Mouthon et al., 2015). Pour comprendre pleinement les enjeux et les mécanismes qui interviennent dans cette étude, les éléments composant ce travail vont être contextualisés et détaillés.

## 1.1 L'équilibre

L'équilibre est responsable de la stabilité du corps et du regard. Son action est basée sur des mécanismes qui modulent le tonus musculaire pour engendrer les adaptations posturales nécessaires au maintien de l'équilibre. Cet équilibrage complexe, dont le rôle est de maintenir l'équilibre du corps malgré les changements de position ou des mouvements, peut être perturbé par un trouble de la perception de son environnement avec sensation de mouvement de type rotatoire (carrousel) ou lors de circonstances pathologiques, par exemple. L'équilibre est un mécanisme plurimodal de stabilisation statique et dynamique. Il utilise d'une part des systèmes récepteurs menant, par voies afférentes, les informations au système nerveux central et d'autre part des systèmes effecteurs, rassemblant l'oculomotricité et l'action des muscles antigravitaires.

L'équilibre est basé sur trois systèmes récepteurs : le système proprioceptif, vestibulaire et la vision. La proprioception est un mécanisme sensoriel somatique élaboré qui donne des informations au système nerveux central sur la position du corps dans l'espace. Ce système se compose de différents types de récepteurs mécanosensibles situés dans les muscles squelettiques et les articulations. Le premier de ces récepteurs est le fuseau neuromusculaire. Il est un détecteur sensoriel spécialisé et son action est essentielle dans les processus antigravitaires. Son rôle est de donner des informations sur la longueur du muscle. Le deuxième récepteur est l'appareil tendineux de Golgi. Il agit comme une jauge de contrainte basée sur les tendons, qui vérifie la tension du muscle ou la force de contraction. La tension du muscle est constamment contrôlée par ce récepteur pour éviter les lésions liées à une trop forte contraction ou à un étirement trop intense. Les récepteurs articulaires sont les derniers récepteurs composant la proprioception. Ils sont situés sur les articulations, comme leur nom

l'indique, et sont formés de trois composants : les terminaisons de Ruffini qui sont responsables de contrôler l'étirement de l'articulation, les récepteurs différentiels qui vérifient les accélérations subies par l'articulation et les récepteurs proportionnels qui détectent l'intensité.

Le système vestibulaire est un système sensoriel spécialisé dans les informations sur la position des yeux et les déplacements de la tête. Il est responsable du sens de l'équilibre, de la coordination des mouvements de la tête et des yeux. Les ajustements posturaux du corps dépendent de lui aussi. Son fonctionnement est normal, automatique et sans perception consciente. Ce système est composé des canaux semi-circulaires et des organes à otolithes. Les canaux semi-circulaires sont responsables de savoir où se situe la tête lors de rotations et les appareils à otolithes sont sensibles à la gravité et donc responsables de savoir comment est positionnée la tête dans l'espace.

Le dernier élément composant la partie afférente de l'équilibre est la vue. C'est un élément d'orientation et de déplacement dans l'espace. La vue donne la position de la personne dans l'espace par rapport aux objets et autres personnes qui l'entourent. Ces informations spatiales sont utilisées par l'orientation, la posture et l'équilibre.

Les informations provenant de ces trois systèmes sensoriels sont amenées aux noyaux vestibulaires afin d'être analysées et comparées entre elles ainsi qu'à des données antérieurement stockées. Une fois les informations traitées et définies comme cohérentes, un mouvement réflexe, moteur de compensation du corps et des yeux, est initié. Le réflexe vestibulo-oculaire donne la stabilisation des yeux et le réflexe vestibulo-spinal permet la stabilisation du corps. L'équilibre et l'orientation spatiale sont donc dépendants de deux systèmes moteurs : l'oculomotricité conjuguée et la motricité somatique qui représentent le système efférent de l'équilibre. De plus la coordination est gérée par le cervelet.

Pour gérer l'orientation spatiale, l'équilibre du regard utilise différents arcs réflexes prenant la voie effectrice de l'oculomotricité, formée des noyaux oculomoteurs, des nerfs oculaires III, IV et VI, ce qui est exprimé par un mouvement conjugué particulier aux yeux, permettant la stabilité du regard.

Au repos comme en mouvement, l'équilibre est maintenu par la contraction des muscles striés du cou, du tronc et des membres. La balance entre l'inhibition et la contraction des muscles antagonistes est essentielle pour le maintien du tonus musculaire. Ce contrôle dépend des informations cutanées, visuelles, proprioceptives et vestibulaires.

## **1.2 L'imagerie mentale et l'observation**

L'imagerie motrice ou mentale est un mécanisme conscient pendant lequel les sujets se représentent intérieurement une action motrice sans l'effectuer réellement, sans mouvement visible et sans contraction musculaire décelable (Papaxanthis et al., 2002). Il a été démontré que la performance motrice est améliorée de manière légèrement inférieure par rapport à l'entraînement physique (Feltz & Landers, 1983). Il a aussi été prouvé que l'imagerie motrice joue un rôle sur le moteur central de programmation des mouvements, ce qui est traduit par une augmentation de la force (Yue, G. et Cole, K. J., 1992). Une autre étude (Hamel, M.F. et Lajoie, Y., 2005) a montré que l'imagerie motrice peut réduire considérablement les oscillations posturales et la demande attentionnelle chez les personnes âgées. Suite à l'observation de l'amélioration des performances engendrées par un entraînement en imagerie mentale ou un entraînement physique, certains auteurs ont proposé que ces deux types d'entraînement soient fonctionnellement équivalents (Hall et al., 1995). Différentes études se servant des paradigmes expérimentaux comme les techniques d'imagerie cérébrale (Ingvar & Philipson, 1977 ; Jeannerod 1999), la mesure d'indices psychologiques (Roure et al., 1999) ou encore le paradigme de chronométrie mentale (Decety & Michel, 1989) ont prouvé cette équivalence. Les mécanismes de la planification, d'élaboration et de programmation de la réponse (Decety & Grèzes, 1999), mais aussi de préparation aux signaux sensoriels afférents (Bonnet et al., 1997), appliqués durant l'imagerie mentale et similaires à ceux de la pratique physique sont démontrés par les résultats de ces études.

### **Modèles et théorie sur les effets de l'imagerie mentale**

Les effets de l'imagerie mentale sur l'apprentissage moteur ou les tâches motrices dans différentes conditions ont tenté d'être expliquées par différents modèles et théories cognitifs comme le modèle analogique ou les modèles de double codage, la théorie de l'apprentissage symbolique, psycho-neuro-musculaire ou bio-informationnelle.

### **Théorie psycho-neuro-musculaire**

La théorie de Jacobson (1932) fut l'une des premières théories élaborées sur les effets de l'imagerie mentale sur les performances motrices. Cette théorie est construite sur l'observation du fait que les mêmes motoneurones, voies neuro-motrices et les mêmes muscles sont actifs aussi bien durant l'imagerie mentale que durant l'exécution réelle du mouvement (Boshker, 2001 ; Driskell et al., 1994 ; Page et al., 2001). Cette théorie propose

que lorsqu'une personne s'imagine l'exécution d'un mouvement, des impulsions nerveuses soient envoyées du cortex moteur aux muscles sélectionnés pour le mouvement. Ces stimuli sont pareils à ceux produits pendant l'exécution réelle du mouvement, mais ils sont légèrement inférieurs en intensité. Ces impulsions nerveuses semblent assez grandes pour donner des rétroactions proprioceptives profitables pour renforcer le programme moteur correspondant aux mouvements simulés, mais aussi pour induire une régulation durant les essais ultérieurs (Magill, 1998), c'est-à-dire que le mouvement imaginé va s'améliorer au fil des essais.

### **Théorie de l'apprentissage symbolique**

La théorie de l'apprentissage symbolique (Sackett, 1934 ; Savoyant, 1986) définit l'imagerie mentale comme étant une activité à dimension symbolique. Elle expose l'imagerie mentale comme permettant la répétition cognitive de la tâche et de ses différentes composantes, tout en considérant ses particularités spatiales, les éventuels problèmes et les buts. L'imagerie mentale est le reflet de l'application d'un plan d'action élaboré au niveau central selon Wrisberg et Ragsdale (1979). Cette théorie a la planification des actions (Fitts & Posner, 1967 ; Theios, 1975) en commun avec la pratique physique. La théorie attribue, en grande partie, l'efficacité de l'imagerie mentale au traitement cognitif qui va de pair avec cette activité, elle suppose donc que l'effet de l'imagerie mentale est plus grand pour des tâches essentiellement cognitives que pour des tâches motrices, c'est-à-dire plus efficace pour les tâches utilisant un haut niveau de traitement de l'information que pour les tâches plus axées sur la motricité. Plusieurs études ont obtenu des résultats soutenant cette théorie (Feltz & Landers, 1983 ; Ryan & Simons, 1983). De nombreux travaux soutenant cette théorie ont mis en lumière l'activation par l'imagerie mentale de certaines zones cérébrales reconnues pour leur action dans la programmation et la planification motrice (Jeannerod, 1999). Cependant, cette théorie ne donne pas de réponse pour comprendre comment les novices peuvent bénéficier de l'imagerie mentale ni comment les personnes expertes dans le domaine peuvent encore améliorer leur performance (Hall, 2001). En plus de cela, il semble très difficile d'essayer de quantifier la composante cognitive dans les tâches motrices.

### **Théorie bio-informationnelle**

La théorie bio-informationnelle de Lang (1979) est une théorie intégrative tirant ses sources de la conception de Pylyshyn (1973) qui soutient que les images sont des systèmes propositionnels logiques ou verbaux. Cette théorie place en interaction l'imagerie mentale et le comportement observable. Selon Lang (1985), l'imagerie mentale trouverait sa source dans la capacité à former des informations qui seraient organisées en trois niveaux stockés dans la mémoire à long terme : la proposition de stimulus, de réponse et de signification. La proposition de stimulus, comprenant ce qu'il y a à imaginer, utiliserait les informations visuelles et verbales, mais donnerait aussi des informations sur l'environnement imaginé. La proposition de réponse mettrait en lien des paramètres verbaux et des réponses physiologiques avec les comportements. La proposition de signification regrouperait les informations sur le sens des stimuli et sur les conséquences des actions.

### **Modèle du double codage**

Avec son modèle du double codage, Paivio (1969, 1971, 1975) donne un nouveau souffle à l'imagerie mentale. Il pose l'hypothèse qu'il existe deux « systèmes de codage » ou « mode de représentation symbolique » qui généreraient l'activité psychique. Le premier est le codage imagé. La représentation est figurative et est construite sur une sémiologie de la ressemblance dont l'évolution est liée à la perception de l'environnement. Elle rassemble les représentations mentales imagées d'objets et de leurs transformations approchant les perceptions sensorielles. Le codage verbal est le second. La représentation de forme propositionnelle est abstraite et est liée à l'expérience du langage qu'a l'individu. Son fonctionnement est une symbolisation linguistique de l'information sous la forme de mots, textes ou phrases. Paivio (1975) déclare que les différents formats de représentation de l'information permettent une diminution de la charge de travail, de la mémoire de travail et de la charge cognitive.

### **Modèle analogique**

Les rapports qui existent entre la perception et l'imagerie ont pu être expliqués, contrairement au modèle de Pylyshyn (1973), par les travaux de Kosslyn (1973). Kosslyn met en évidence le fait qu'il y aurait une analogie fonctionnelle entre la structure de l'image mentale et celle de l'objet. L'objet et les images mentales, considérés comme des représentations, auraient une correspondance analogique non arbitraire. Cela implique qu'à chaque partie de l'objet correspondrait une partie de la représentation gardant les

particularités structurales de l'objet (Kosslyn, 1980). C'est le travail de Kosslyn, Ball et Reiser (1978) qui est à l'origine de la théorie analogique. Leurs sujets devaient mémoriser la carte d'une île imaginaire, au point de pouvoir la redessiner. Il y avait 7 lieux placés de manière à ce que les 21 distances entre ces lieux soient visibles. Les sujets devaient parcourir les trajets séparant deux lieux en chronométrant le temps du trajet. Ils ont découvert une relation entre la durée des trajets imaginés et la distance entre les lieux sur la carte. Ce modèle a été élaboré en prenant les images mentales comme assimilées à des représentations mentales gardant les distances relatives et tissant une relation analogique avec les objets.

L'observation est l'action d'observer quelqu'un ou soi-même, par l'intermédiaire d'un miroir ou d'une vidéo, exécuter un mouvement ou une série de mouvements. Nous pouvons diviser l'observation en deux catégories : l'observation passive et l'observation active. Il a été prouvé que regarder la personne dans la vidéo comme si on s'observait dans un miroir simplifie l'imitation (Koski et al., 2003) et l'apprentissage par imitation (Higuchi et al., 2012).

L'observation passive consiste à regarder un mouvement ou une série de mouvements comme si l'on regardait un film, sans se concentrer sur des points précis, mais en observant ce qui se passe de manière générale.

L'observation active est légèrement plus complexe dans son fonctionnement. Elle consiste, comme pour l'observation passive, à observer un mouvement ou une séquence de mouvements, mais cette fois-ci en se concentrant sur ce qui fait la spécificité du mouvement. Par exemple pour un appui renversé en gymnastique, le sujet va se concentrer sur la position du corps pour tenir l'équilibre, où et comment placer les mains pour avoir le maximum de stabilité ou encore comment positionner la tête pour qu'elle n'influe pas sur la position du corps et qu'elle n'engendre pas une perte d'équilibre.

Il est possible d'associer l'observation active avec l'imagerie mentale (imagerie proprioceptive) (Mouthon et al., 2015; Roosink and Zijdwind, 2010). Dans ce cas-là, le sujet devra non seulement se concentrer sur les points importants du mouvement ou de la séquence de mouvements, mais il devra simultanément s'imaginer contracter, sans le faire physiquement, tous les muscles nécessaires à la réalisation du mouvement.

De nombreuses études (Fadiga et al., 1995, 1998 ; Gallese et al., 1996 ; Gerardin et al., 2000 ; Rizzolatti et al., 1996, 2001 ; Strafella and Paus 2000 ; Buccino et al., 2001, 2004 ; Ehrsson et al., 2003 ; Szameitat et al., 2007) ont démontré que l'imagerie motrice et

l'observation activent des aires cérébrales similaires que celles utilisées dans les performances. Buccino et al. (2001) montrent que l'observation de performances active l'aire prémotrice du cerveau dans une organisation somatotopique, suggérant une cohésion entre le processus d'observation et d'exécution (Szameitat et al., 2007). Jeannerod (1994) suggère que l'intervention de la représentation n'a rien d'étonnant, mais fournit un mécanisme d'apprentissage moteur de performance au travers duquel l'observation et l'imagerie simulent des actions de façon interne, tenant compte du développement de la performance ou d'une pratique indépendante de l'actuelle pratique physique.

Ces études considèrent le rôle joué par l'imagerie motrice et l'observation dans le développement de mouvements liés à la performance. Il ressort de cela que les mécanismes psychologiques actifs pendant l'apprentissage d'une performance physique le sont aussi durant les conditions d'imagerie motrice et d'observation. Les études menées sur la neuroscience cognitive et l'application de la psychologie sportive montrent que l'imagerie mentale et l'observation peuvent contribuer significativement au changement de plasticité durant l'apprentissage de mouvements de performance (Fadiga et al., 1995, 1999 ; Gallese et al., 1996 ; Gerardin et al., 2000 ; Holmes and Collins, 2001; McCullagh and Weiss 2001, 2002 ; Montoya et al., 1998 ; Morris et al., 2005; Murphy et al., 2008 ; Rizzolatti et al., 1996, 2001 ; Strafella and Paus 2000 ; Buccino et al., 2001, 2004 ; Ehrsson et al., 2003 ; Szameitat et al., 2007).

### **1.3 Mécanismes impliqués dans la simulation mentale**

Une étude (Lotze, M. et al., 1999) a démontré que la zone motrice supplémentaire (SMA), le cortex prémoteur (PMC) et le cortex moteur primaire (M1) ont une activité significative tant au cours de l'EM que de l'IM de mouvements de la main droite et gauche, mais le cortex somatosensoriel (S1) a été activé qu'au cours de l'EM. L'étude a aussi montré que l'activation du cervelet homolatéral a diminué au cours de l'IM par rapport à l'EM. Dans le cervelet, l'IM et l'EM différaient dans leur foyer d'activation maximale : la plus haute activation ipsilatérale du cervelet fut observée dans le lobe antérieur (Larsell lobule H IV) pendant l'EM, alors qu'un maximum plus faible a été trouvé à environ 2 cm dans la partie dorsolatérale (Larsell lobule H VII) durant l'IM. Les régions préfrontales et pariétales n'ont subi aucun changement significatif au cours de l'étude. Cela démontre que l'imagerie motrice et les performances motrices possèdent des substrats neuronaux similaires. De plus, de nombreuses autres études montrent que l'IM (Gerardin et al., 2000; Grezes & Decety, 2001; Hallett et al., 1994; Jeannerod, 2001; Kimberley et al., 2006; Lotze et al., 1999; Sirigu

et al., 1995; Stephan et al., 1995) et AO (Gallese et al., 1996; Grezes & Decety, 2001; Neuper et al., 2005) activent les mêmes régions du cortex qui sont activées durant l'exécution réelle d'une tâche non posturale.

### **1.3.1 Mécanismes impliqués dans la simulation mentale des tâches d'équilibre**

Il a déjà été prouvé que le SMA, le cortex prémoteur, M1, le ganglion basal (putamen) et le cervelet jouent un rôle important dans le contrôle de l'équilibre exécuté physiquement (Beck et al., 2007; Ouchi et al., 1999 ; Schubert et al., 2008; Taube et al., 2006, 2007). Une étude de Taube et al. (2015) montre pour la première fois que ces régions du cerveau peuvent également être activées par AO + IM d'une tâche d'équilibre dynamique ; IM produit une activité comparable dans le SMA, le putamen et le cervelet. En revanche, l'étude n'a montré aucune activation de ces zones motrices par AO. En outre, pour AO + IM et IM, l'activité était plus importante pour la tâche dynamique que la tâche statique. Sur la base de ces résultats, l'on peut dire que les meilleurs effets de formation doivent survenir lorsque le sujet applique AO + IM pour des tâches d'équilibre difficiles. Cela pourrait être pertinent pour les patients immobilisés temporairement à cause d'une blessure et qui veulent éviter de passer par la phase de rééducation ou de récupération. Mais les futures études devront vérifier si AO + IM mènent à un regain plus rapide du niveau de compétence.

## **1.4 Formes d'imagerie impliquées dans la stimulation mentale**

De nombreux facteurs interviennent au niveau de l'imagerie mentale. Certains facteurs, selon Hall (2001), semblent plus importants que d'autres. En effet, il semblerait que les modalités d'imagerie et la capacité d'imagerie jouent des rôles plus centraux que le moment de réalisation ou la durée des séances.

Notre environnement ou notre corps fournissent les modalités sensorielles qui sont à la base des images mentales. Celles-ci peuvent être classées en plusieurs catégories : il y a les images visuelles, proprioceptives, auditives, tactiles, gustatives, olfactives et plurimodales. Bien que dans le domaine du sport nous étudions plus particulièrement l'imagerie visuelle, il est possible de créer des images se basant sur plusieurs modalités sensorielles qui peuvent avoir des effets différents sur la performance sportive.

### **L'imagerie visuelle**

Il est possible de réaliser une imagerie visuelle depuis une perspective externe, ce qui veut dire que le sujet va s'imaginer réaliser un mouvement ou une suite de mouvements à la troisième personne. La personne sera alors comme un observateur externe de son action ou de celle d'une autre personne qu'il s' imagine voir effectuer l'action. L'imagerie visuelle peut aussi être exécutée depuis une perspective interne dans laquelle le sujet se place du point de vue de l'exécutant et va s'imaginer voir les conséquences résultant de la réalisation du mouvement. Plusieurs études ont déjà démontré une amélioration de la performance après une pratique en imagerie visuelle, qu'elle soit interne ou externe, dans plusieurs tâches comme la gymnastique ou l'escalade (Hardy, 1997 ; Hardy & Callow, 1999). Il faut aussi signaler qu'il peut y avoir des confusions entre les différentes perspectives et modalités d'imagerie et que la nature de la tâche à effectuer paraît influencer l'efficacité d'un apprentissage basé sur ces modalités.

### **L'imagerie proprioceptive**

D'après Hall et al. (1992), l'imagerie proprioceptive est basée sur la sensation d'un mouvement ou d'une action. Durant cette modalité, le sujet doit s'évoquer mentalement les sensations de mouvement, de force et d'effort qui découlent de la réalisation d'un mouvement sans l'exécuter réellement (Hall et al., 1985 ; Jeannerod, 1994 ; MacIntyre & Moran, 1996). En général, les études faites sur le sujet témoignent des bénéfices de l'imagerie proprioceptive dans plusieurs disciplines sportives comme la gymnastique ou encore le patinage artistique (Barr & Hall, 1992 ; Hardy & Callow, 1999 ; Mumford & Hall, 1985 ; Rodgers et al., 1991). Cependant, il a été démontré que l'amélioration des performances sportives n'intervient seulement une fois un degré d'expertise maîtrisé (Hardy & Callow, 1999 ; Isaac, 1992 ; Mahoney & Avenier, 1977).

### **Capacité en imagerie mentale**

Il est essentiel d'identifier et de quantifier les capacités ou mécanismes qui interviennent dans les performances sportives (Hall et al., 1985). Plusieurs auteurs déclarent qu'il est important de prendre en compte la capacité d'imagerie du mouvement qui traduit la facilité ou la difficulté à exécuter l'imagerie mentale (Hall, 2001). Même si tout le monde semble posséder la capacité de produire et utiliser des images mentales, de grosses différences interindividuelles ressortent et celles-ci seraient le résultat de l'interaction entre l'expérience et les variabilités génétiques (Hall et al., 1992 ; Paivio, 1986). Pour mesurer la capacité

d'imagerie mentale, on peut passer un test basé sur une échelle de clarté des images imaginées.

### **Autres déterminants de la pratique en imagerie mentale**

Comme nous l'avons dit plus haut, il existe d'autres facteurs qui interviennent de façon moins importante dans la pratique de l'imagerie mentale (Hall et al., 1992). Dans cette catégorie de facteurs se trouvent : le degré d'expertise des sujets, le contexte de la réalisation de l'imagerie mentale et la durée des séances.

#### **1.4.1 Formes d'imagerie impliquées dans la simulation des tâches d'équilibre**

Les formes d'imagerie intervenant dans la simulation des tâches d'équilibre de notre étude ont déjà été décrites dans la partie sur l'imagerie mentale et l'observation. En effet les tâches demandées lors de l'étude combinent l'observation active avec l'imagerie proprioceptive. L'accent sera donc mis sur ce qui fait la spécificité des mouvements que l'on doit observer. En plus de l'observation active, l'imagerie proprioceptive est exécutée en même temps que l'observation active. En plus de se concentrer sur des points précis, l'imagerie proprioceptive demande de s'imaginer contracter les mêmes muscles au même moment que la personne que l'on doit observer faire le mouvement, sans contraction musculaire apparente. Cela doit servir à lui faire ressentir la sensation du mouvement, de la force et de l'effort qui découle de la réalisation du mouvement que l'on observe.

### **1.5 L'inhibition**

La transmission synaptique inhibitrice dans le cerveau est essentiellement gérée par l'acide gamma-aminobutyrique (GABA) qui est un neurotransmetteur présent dans toutes les couches du cortex (Jones, 1993). Parmi les trois types de récepteurs GABA, les récepteurs GABAA et GABAB sont les plus largement répandus dans le système nerveux central (Watanabe et al., 2002). Les neurones GABA et les récepteurs GABA sont des éléments remarquables de l'organisation du cortex cérébral. Ils servent à façonner les propriétés des neurones de stimulus-réponse dans les zones sensorielles et jouent sans aucun doute un rôle comparable dans les zones non sensorielles.

Ces neurones GABA ont été les plus largement étudiés dans le domaine de la recherche neurophysiologique et dans les utilisations thérapeutiques. Certaines de ces études portent sur le cortex moteur humain, sur les mesures d'excitabilité, qu'elles soient corticospinales

ou intracorticales, et sur l'inhibition intracorticale. Ces modulations de l'excitabilité ou de l'inhibition sont quantifiées par la stimulation magnétique transcrânienne (TMS). Au moyen de cette méthode, le rôle des récepteurs GABA dans le mécanisme de l'inhibition intracorticale à intervalle court (SICI) a été établi (Ziemann et al., 1996). Un SICI est composé de 2 stimuli consécutifs séparés par quelques millisecondes. Le premier stimulus est à 80% RMT et le deuxième à 120% RMT, ce qui produit un effet d'inhibition. Les SICI sont utilisés dans un protocole de TMS à impulsion jumelée (Kujirai et al., 1993 ; Ziemann et al., 1996c).

L'inhibition joue un rôle important dans l'imagerie mentale, car il a été démontré que celle-ci influence l'excitation corticospinale et l'inhibition intracorticale (Mouthon et al., 2015; Stinear and Byblow, 2004). Il a également été prouvé que dans le domaine du sport, l'imagerie mentale peut augmenter les performances sportives dans certaines disciplines (Hardy, 1997; Hardy & Callow, 1999). Cette augmentation de performance s'accompagne d'excitations corticospinales et d'inhibitions intracorticales. Lors de l'imagerie mentale, l'excitation corticospinale provenant de certains muscles va augmenter pour imaginer la réalisation de tâches complexes par exemple. Alors que d'autres muscles vont être inhibés car le cortex cérébral va sélectionner les muscles les plus importants dans l'exécution de la tâche imaginaire ou parce que le sujet a atteint un niveau d'expertise dans la tâche à exécuter.

## **1.6 Impacts de l'entraînement d'équilibre**

L'entraînement d'équilibre est non seulement efficace pour améliorer le contrôle postural, mais aussi pour augmenter le taux de développement de la force, l'exécution de saut et la régénération après une blessure (Gruber et al., 2007 ; Kean et al., 2006 ; Taube et al., 2007, 2008). Mais il semble aussi que l'entraînement d'équilibre induise des adaptations au niveau du système nerveux central (SNC). Une étude récente (Taube, W., 2012), effectuée avec des procédés électrophysiologiques et des techniques d'imagerie, suggère que l'entraînement de l'équilibre réduit l'excitabilité des réflexes spinaux. Les études portant sur les circuits des réflexes spinaux au cours des tâches posturales au moyen de la stimulation des nerfs périphériques montrent que la formation de l'équilibre réduit l'excitabilité des réflexes spinaux. Les expériences utilisant les TMS afin d'en déduire les changements dans l'excitabilité corticale démontrent une haute excitabilité corticale au début de la formation de l'équilibre des interventions, qui diminue avec l'amélioration de la tâche d'automatisation. Les mécanismes des structures subcorticales sont moins bien compris, mais peuvent

apparemment se développer contrairement aux adaptations du cortex moteur (Taube, W., 2012). Des résultats récents, obtenus par différentes techniques d'imagerie, soutiennent l'idée que la matière grise et la matière blanche du cerveau s'adaptent rapidement en réaction à un entraînement de l'équilibre, vu que les changements structurels sont déjà visibles après deux séances d'équilibre (Taube et al., 2008, 2010). Avec les connaissances actuelles, on peut affirmer que la plupart des adaptations supraspinales dans le SNC sont surtout responsables de l'amélioration des paramètres fonctionnels comme les compétences d'équilibre, la force explosive ou encore le contrôle des mouvements de coordination (Gruber et Gollhofer, 2004 ; Schubert et al., 2008).

Malgré les études déjà faites sur l'entraînement d'équilibre, aucune ne traite de l'impact que pourrait avoir un entraînement d'équilibre sur l'imagerie mentale de l'équilibre et l'inhibition intracorticale. Il est probable qu'un entraînement d'équilibre mène à une facilitation de l'imagerie motrice des tâches d'équilibre. Le sujet va augmenter sa capacité d'imagerie et l'efficacité de celle-ci, car les tâches d'équilibre qu'il doit effectuer ne lui sont plus inconnues et il les a déjà exécutées dans la réalité. Comme dit précédemment, on observe une augmentation de l'excitation corticale au début de la période d'entraînement, car le cerveau est en phase d'apprentissage, et celle-ci diminue lors que le sujet a automatisé la tâche. Il est donc possible que l'inhibition intracorticale diminue lorsque le sujet commence les entraînements de l'équilibre, car le cortex a besoin de beaucoup de ressources pour apprendre la tâche, et augmente lorsque la tâche est automatisée, parce que le cerveau demande moins de ressources pour l'exécution des tâches d'équilibre qui sont automatisées. L'imagerie motrice activant les mêmes régions du cerveau que le fait d'exécuter réellement le mouvement, il est probable qu'il y ait un changement au niveau de l'ECS et du SICI lors d'une simulation mentale après un entraînement d'équilibre.

Cependant, même si le rôle des mécanismes inhibiteurs au cours d'exercice physique d'équilibre est connu (Papegaaij et al., 2014), leur implication durant l'observation et l'imagination des tâches posturales reste indéfinie.

Le but de cette étude est d'essayer de répondre à deux questions de recherches. La première est de savoir si l'observation et l'imagerie mentale influencent l'inhibition intracorticale et la deuxième est de vérifier si un entraînement de l'équilibre engendre un changement au niveau de processus neurophysiologiques lors de la stimulation mentale. Dans cette perspective, l'équilibre est expérimenté par différents tests d'équilibre statique et dynamique, de difficultés variables. L'imagerie mentale et les mécanismes inhibiteurs seront

évalués par une méthode neurophysiologique. Les hypothèses émises sont qu'il y aurait une augmentation de l'inhibition intracorticale lors d'une tâche d'équilibre facile et une diminution de celle-ci lors d'une tâche difficile d'équilibre, et qu'il y aurait un changement de l'ECS et du SICI lors de la simulation mentale après un entraînement de l'équilibre.

## **2 Méthode**

### **2.1 Participants**

Pour cette étude, nous avons choisi 27 sujets entre 18 et 25 ans, hommes et femmes, en bonne santé. Les participants pratiquaient tous du sport au moins une fois par semaine dans des disciplines très variées telles que le football, la gymnastique aux agrès, le kitesurf ou encore le ski. Les sujets ne devaient pas suivre d'entraînement d'équilibre régulier et spécifique afin de ne pas fausser les résultats des tests. Les sujets ne devaient pas non plus présenter de blessures pouvant avoir une influence négative sur les exercices que nous devions faire passer pendant la phase de tests. Les sujets ne prenaient pas non plus de médicaments ou de substances pouvant altérer les résultats des tests. Avec les participants à l'étude nous avons formé 2 groupes : le groupe entraînement et le groupe contrôle. Le TG comprenait 14 participants, 8 hommes et 6 femmes. Le CG comptait 13 participants, 9 hommes et 4 femmes. Nous avons dû exclure 2 participants, le premier est venu passer le pré-test pour les mesures initiales, mais pour une raison inconnue ne s'est pas présenté au post-test, ses données n'étaient pas complètes et donc inexploitable. Le deuxième a passé le pré-test, mais pour le post-test, ces mesures étaient inexploitable, car nous n'arrivions pas à avoir de MEP et de SICI assez grands pour travailler de manière fiable. Nous avons aussi dû faire passer un sujet du groupe entraînement au groupe contrôle, car le test du stabilomètre était trop simple pour lui et sa marge de progression était trop petite pour pouvoir être exploitée.

Les participants ont tous reçu les informations indispensables au bon déroulement de notre étude et ont pu poser les questions éventuelles. Aucun participant ne présentait de critères d'expulsion à l'étude après avoir lu le formulaire. Aucun sujet n'a décidé de se retirer de l'étude après avoir pris connaissance des éventuels désagréments que pourrait causer le TMS (stimulation magnétique transcrânienne). Les participants ont signé un formulaire de consentement afin que l'étude se déroule selon les règles d'éthique en vigueur.

## 2.2 Test imagerie mentale

Lors de ce test, le sujet est allongé sur le dos sur une table et un écran est fixé au-dessus de sa tête (Fig. 1).



Fig. 1 – Test imagerie mentale

Nous montrions ensuite deux vidéos différentes d'une personne sur un stabilomètre que le sujet devait regarder en lui expliquant qu'une des vidéos montre une posture statique, la personne est immobile sur le stabilomètre, et l'autre est dynamique, la personne tient activement l'équilibre sur le stabilomètre. Le sujet devait observer chaque vidéo une fois passivement et une fois activement, ce qui fait 4 conditions différentes (AOP, AOS, POP, POS). Le sujet devait regarder l'écran comme s'il regardait un miroir. Lorsque le sujet devait regarder les vidéos de façon passive, il devait juste observer la vidéo comme s'il regardait un film. Lorsqu'il devait observer la vidéo activement, le sujet devait s'imaginer contracter les mêmes muscles au même moment que la personne sur le stabilomètre dans la vidéo. Dans les deux cas, le participant ne devait produire aucune contraction musculaire, car cela aurait faussé les réactions musculaires induites par les MEPs et les SICIs. Le design de l'étude (Fig. 2) consistait à envoyer 6 stimuli « control » suivis de 12 stimuli « condition ». Les 4 conditions sont visionnées 4 fois chacune et à chaque fois précédées et suivies par 6 stimuli « control ». Après le visionnage des 4 conditions, je faisais une petite pause pour le sujet. La pause était précédée et suivie par 6 stimuli « control » et non directement par la condition. Un stimulus sur deux est un MEP et l'autre est un SICI. Les stimuli sont alternés une fois sur deux. Durant le moment où ils reçoivent les 6 stimuli « control », les sujets doivent se détendre et fixer une croix blanche au milieu de l'écran.

Lorsqu'ils reçoivent les 12 stimuli « condition », ils sont en train de regarder une des vidéos passivement ou activement. Si le test s'était déroulé sans accroc, il devait y avoir 156 triggers.

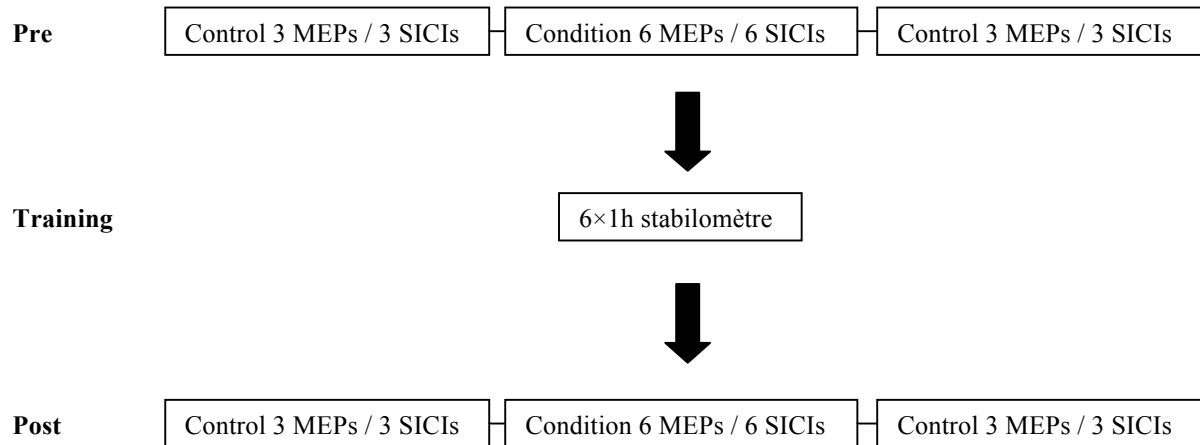


Fig. 2 – Design de l'étude

### 2.3 Entraînement d'équilibre

Un stabilomètre (Fig. 3) est utilisé d'une part dans les phases d'entraînement et d'autre part dans les phases de test. Un stabilomètre est une planche mobile pouvant basculer sur la gauche et sur la droite. Le but de la personne qui se trouve dessus est de tenir la planche le plus longtemps possible à 0°. Le temps est enregistré par un stabilometer (Lafayette Instruments Co.). Cet appareil calcule le temps passé à 0°, mais aussi le temps passé sur la gauche ou la droite au moment où la planche du stabilomètre s'incline avec un angle plus grand que 5°.

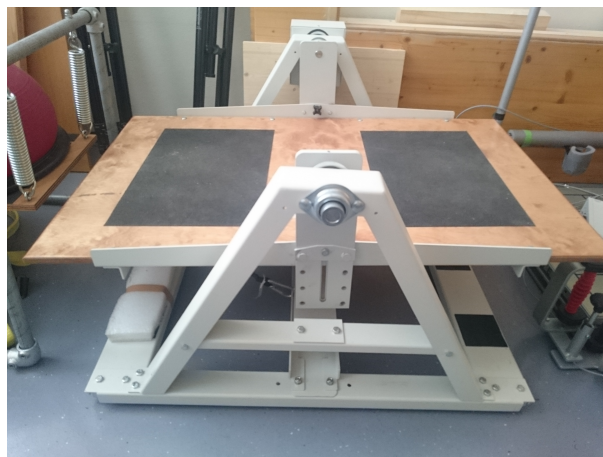


Fig. 3 - Stabilomètre

L'entraînement s'est fait en six séances d'une heure chacune et étalées sur deux semaines. La séance d'entraînement se déroule de la façon suivante : 15x30 secondes de stabilomètre avec deux minutes de pause entre chaque essai. Une feuille de papier avec une croix au centre est fixée contre le mur en face du stabilomètre pour servir de point de repère pour les participants. Ils avaient aussi la possibilité de prendre un autre point de repère du moment qu'ils regardaient devant eux et pas sur le stabilomètre. En effet, il était indispensable que les sujets ne regardent pas le niveau qui se trouvait sur le stabilomètre, car celui-ci leur aurait donné un feedback continu sur la position de la planche et cela aurait faussé l'exercice. Le but de l'exercice était de tenir la planche mobile du stabilomètre à 0° le plus longtemps possible. Après chaque essai, le sujet recevait un feedback qui lui indiquait combien de temps il avait réussi maintenir la planche du stabilomètre à 0°.

Avant de passer le pré-test ou le post-test, les sujets devaient faire 3 x 30 secondes sur le stabilomètre avec le même objectif que pour l'entraînement d'équilibre. Ces mesures nous servaient à vérifier s'il y avait une amélioration significative entre le pré-test et le post-test, pour le TG et pour le CG.

## **2.4 TMS**

Durant une stimulation magnétique transcrânienne (TMS), une bobine magnétique dépolarise certains neurones, ce qui engendre des contractions musculaires. Ces contractions musculaires exposent la modification du potentiel électrique produite par le système nerveux en réponse à la stimulation externe du TMS (MEP). Nous allons ensuite analyser ces MEPs pour vérifier si une inhibition du muscle soleus s'est manifestée ou pas.

Le cortex moteur gauche est stimulé par une 95-mm focal « butterfly-shaped » coil (D-B80) et une MagPro X100 avec un simulateur magnétique MagOption (both MagVenture A/S, Farum-shaped, Denmark) (Fig.4) pour produire des MEPs dans le soleus droit.

Une fois les électrodes posées, nous cherchions le hot spot du sujet, c'est-à-dire l'endroit du cortex qui contrôle les trois muscles à mesurer pour pouvoir les activer à l'aide de stimuli produits par TMS. Lorsque nous recherchions le hot spot, le sujet était assis sur une chaise, complètement détendu au niveau des jambes pour ne pas fausser les mesures. Le hot spot situé, nous faisions des marques au feutre sur la tête du sujet pour une question pratique lorsque nous fixions la bobine sur la tête du sujet.

Il nous fallait ensuite calculer le seuil au repos du sujet (RMT), l'intensité des stimuli la plus faible à laquelle nous pouvions observer une réaction musculaire assez grande sur l'EMG pour pouvoir exploiter les données. L'amplitude devait être comprise entre 0.5 et 1 mv et

cela pendant la durée de 5 MEPs d'affilée. Le sujet devait ensuite aller s'allonger sur une table sur le dos dans la position la plus agréable possible pour la prise de mesures.

Les MEPs induits étaient à 120% RMT. Les SICIs induits étaient composés de 2 stimuli consécutifs séparés par 2.5 ms. Le premier stimulus était à 80% RMT et le deuxième à 120% RMT. Dans la mesure du possible, l'amplitude de l'EMG des SICI devait à chaque fois être plus petite que celle du MEP, car le SICI devait induire une inhibition musculaire.

## **2.5 EMG**

L'objectif de l'EMG est d'étudier l'activité musculaire de différents muscles avec l'utilisation d'électrodes. Pour cela, les électrodes sont posées sur une partie de la peau au-dessus du muscle après que celle-ci ait été rasée et désinfectée pour une pose optimale. Un ensemble de câbles relie les électrodes à l'ordinateur. Jusqu'à ce jour, aucun effet secondaire lié à l'EMG n'a été observé. Les MEPs ont été enregistrés en utilisant des électrodes bipolaires de surface (Blue sensor P, Ambu, Bad Nauheim, Germany). Les électrodes sont fixées sur le soleus, sur le tibialis anterior et sur le gastrocnemius de la jambe droite après une préparation de la peau. L'électrode de référence est placée sur le plateau tibial. Les données sont enregistrées par le logiciel (LabView based, National Instruments, Austin, TX, USA) et stockées sur un ordinateur.

## **2.6 Traitement et analyse statistique des données**

Après les prises de mesures du pré-test et du post-test, le « peak 2 peak », qui est l'amplitude entre le maximum positif et le minimum négatif du MEP apparaissant sur l'électromyogramme, a tout d'abord été observé.

La moyenne des SICI est ensuite divisée par la moyenne des MEP pour donner un SICI normalisé. Par la suite, les valeurs extrêmes ont été enlevées pour que la valeur des moyennes des contrôles et des conditions ne soit pas supérieure à 1. Au maximum 3 valeurs ont été enlevées, que cela soit dans les contrôles ou dans les conditions. Si la moyenne des contrôles ou des conditions ne passait pas en dessous de 1 en éliminant 3 valeurs extrêmes, les moyennes restaient telles quelles.

Après cela, la moyenne des contrôles a été faite avant et après les conditions pour MEPs et pour les SICIs.

Une fois cela fait, le résultat obtenu pour les conditions était divisé par celui des contrôles et j'observais si les conditions avaient plus ou moins d'inhibition que les contrôles. Si les

conditions avaient plus d'inhibition, le résultat de la division était inférieur à 1 et si les conditions avaient moins d'inhibition, le résultat était supérieur à 1. Bien sûr, ce que nous voulions observer était que le résultat soit en dessous de 1. Il y avait une valeur par sujet et par condition lors de la division de la moyenne des conditions par celle des contrôles. Pour ce qui est du SICI, il faut savoir que plus le résultat est proche du 0, plus l'inhibition est grande.

Tous les résultats statistiques présentés ci-dessus proviennent d'ANOVA. Les analyses de variance ou ANOVA sont des techniques permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes. Les résultats sont considérés comme significatifs si la valeur de  $p$  est inférieure à 0.05, qui est la valeur du seuil significatif.

## 3 Résultats

### 3.1 Résultats stabilomètre

En ce qui concerne les résultats au stabilomètre, nous pouvons observer un effet de groupe significatif ( $F_{1,23} = 18.7$  ;  $p = 0.00025$ ), c'est-à-dire que la différence entre le TG et le CG n'est pas due au hasard. Le graphe (Fig. 5) nous montre également un effet significatif au niveau du temps ( $F_{1,23} = 38.2$  ;  $p = 0.0000026$ ), il y donc une augmentation significative de la performance en équilibre entre le pré-test et le post-test pour le TG et y compris pour le CG. Nous remarquons également que l'interaction Groupe x Time ( $F_{1,23} = 7.32$  ;  $p = 0.013$ ) donne un résultat significatif. Il y a donc une différence significative entre le groupe « entraînement » et « contrôle » entre le pré-test et le post-test.

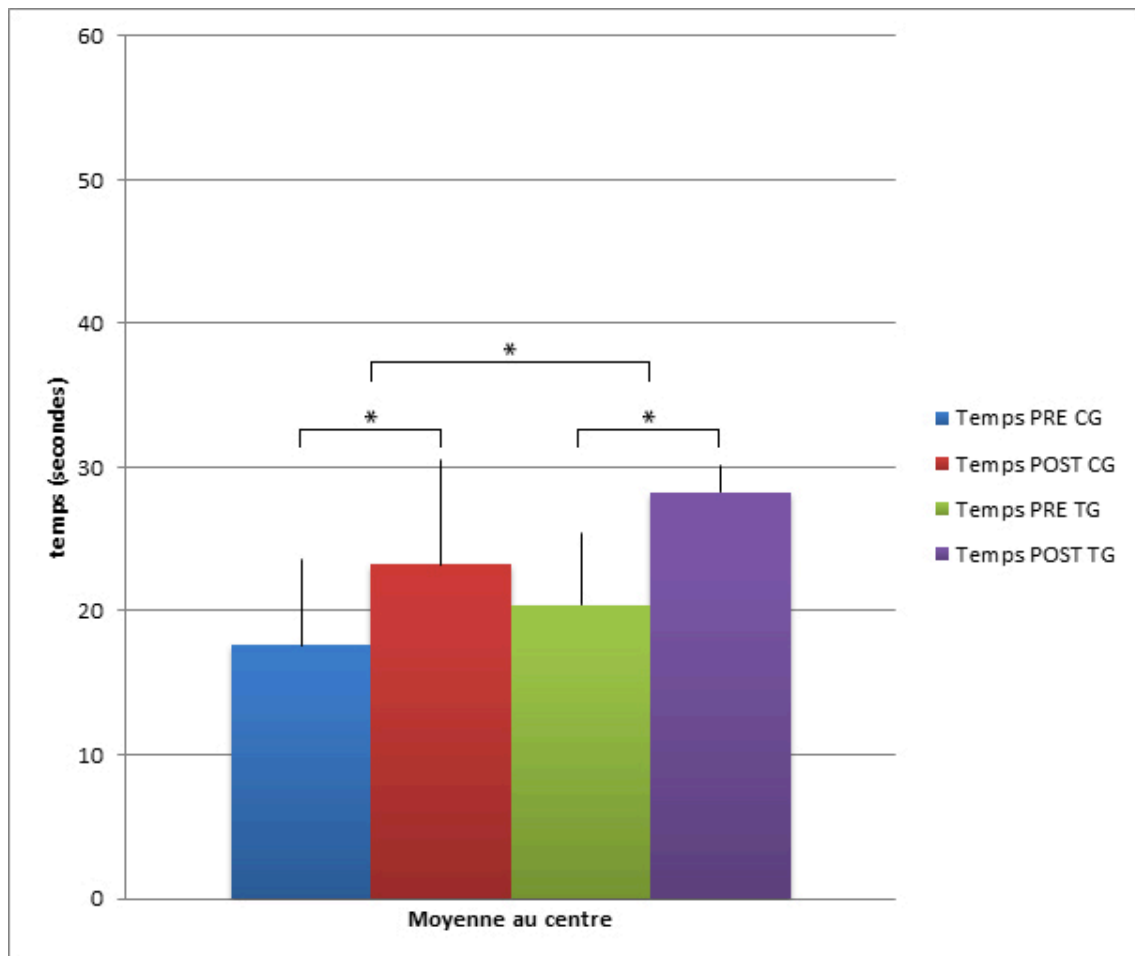


Fig. 5 – Résultats des performances au centre sur stabilomètre

## 3.2 Différences entre les groupes au niveau de l'ECS

### 3.2.1 Gastrocnemius

Nous remarquons un effet significatif au niveau du paramètre du temps ( $F_{1,23} = 5.4$  ;  $p = 0.03$ ) sur les deux graphes suivants (Fig. 6 et 7). L'augmentation de l'excitabilité corticospinale est donc perceptible entre le pré-test et le post-test. Nous distinguons un autre effet significatif au niveau de la condition mentale ( $F_{1,23} = 1.1$  ;  $p = 0.003$ ), il y a donc une différence de modulation du MEP entre l'observation active et passive des vidéos. Les facteurs et interactions de facteurs non traités dans ce paragraphe ne donnent aucun effet significatif.

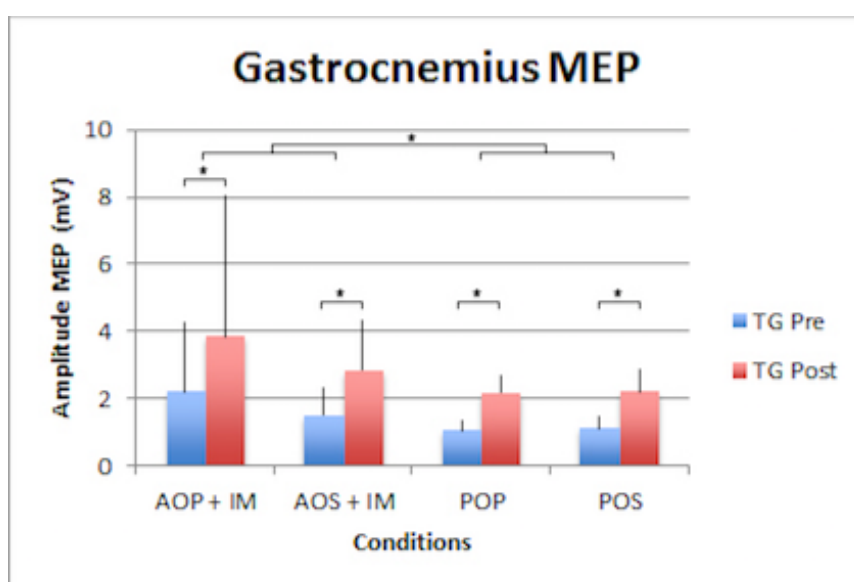


Fig. 6 – Résultats MEP des tests groupe entraînement

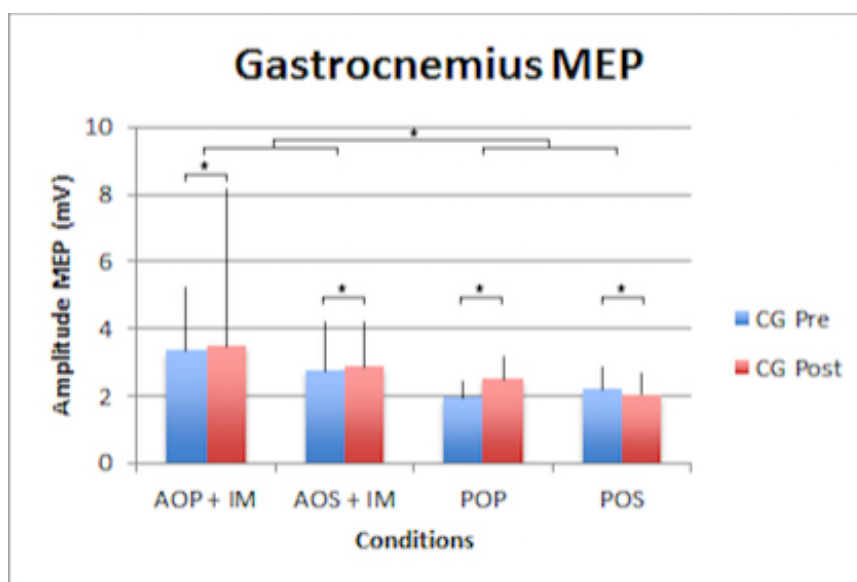


Fig. 7 – Résultats MEP des tests groupe contrôle

### 3.2.2 Soleus

En ce qui concerne l'ECS du soleus, il n'y a pas d'effet significatif de groupe. Il n'y a donc aucune différence significative entre le groupe ayant suivi l'entraînement et le groupe contrôle. Nous pouvons observer sur les graphiques (Fig. 8 et 9) un effet significatif au niveau de la condition mentale ( $F_{1,23} = 1.3$  ;  $p = 0.0006$ ), les sujets ont donc été sensibles aux différentes conditions mentales. Nous pouvons aussi remarquer une différence de l'ECS au niveau de l'interaction Groupe x Mental ( $F_{1,23} = 4.2$  ;  $p = 0.033$ ). Il y a une différence significative entre les groupes selon les conditions mentales. Un effet significatif ressort de l'interaction entre la condition mentale et la posture ( $F_{1,23} = 1.6$  ;  $p = 0.029$ ), une différence significative apparaît entre la posture dynamique et la posture statique selon les conditions mentales. Une différence significative ressort également de l'interaction entre les groupes, les conditions mentales et les différentes postures ( $F_{1,23} = 3.4$  ;  $p = 0.0025$ ). Un effet entre les deux groupes est visible selon la condition mentale et la posture utilisées. Les résultats n'ayant pas été présentés, sont ressortis non significatifs de l'analyse.

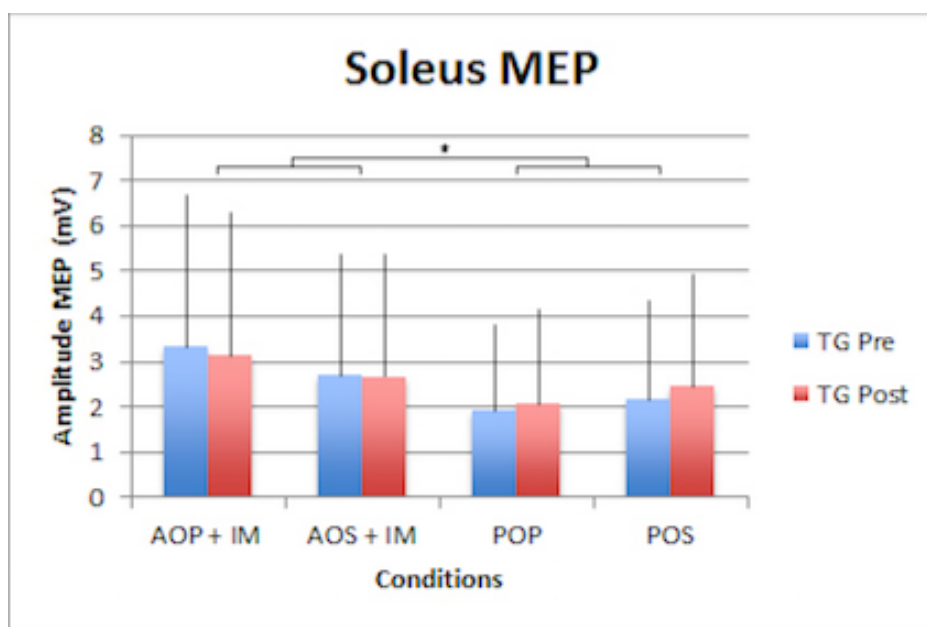


Fig. 8 – Résultats MEP des tests groupe entraînement

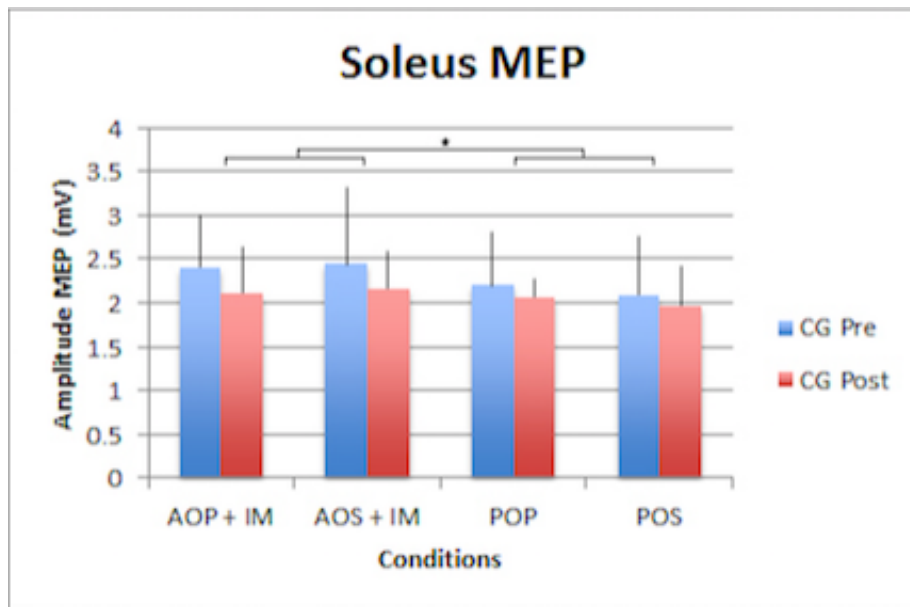


Fig. 9 – Résultats MEP des tests groupe contrôle

### 3.2.3 Tibialis anterior

Les résultats (Fig. 10 et 11) montrent un effet significatif au niveau de la condition mentale ( $F_{1,23} = 1.2$  ;  $p = 0.000012$ ). Les différentes conditions mentales ont une influence sur les sujets de l'étude. Nous pouvons aussi relever un effet significatif lors de l'interaction entre le temps et la condition mentale ( $F_{1,23} = 1.5$  ;  $p = 0.027$ ). Il y a donc une différence significative entre les conditions passées lors du pré-test et celles passées durant le post-test sur les sujets. Un autre effet significatif est observable dans l'interaction entre les conditions mentales et les postures ( $F_{1,23} = 2.4$  ;  $p = 0.019$ ). L'interaction entre les groupes, les conditions mentales et les postures ( $F_{1,23} = 2.4$  ;  $p = 0.019$ ) donne un effet significatif pour notre étude. Une différence significative entre les groupes est observable suivant les conditions mentales et les postures que l'on combine. Le reste des résultats est non significatif.

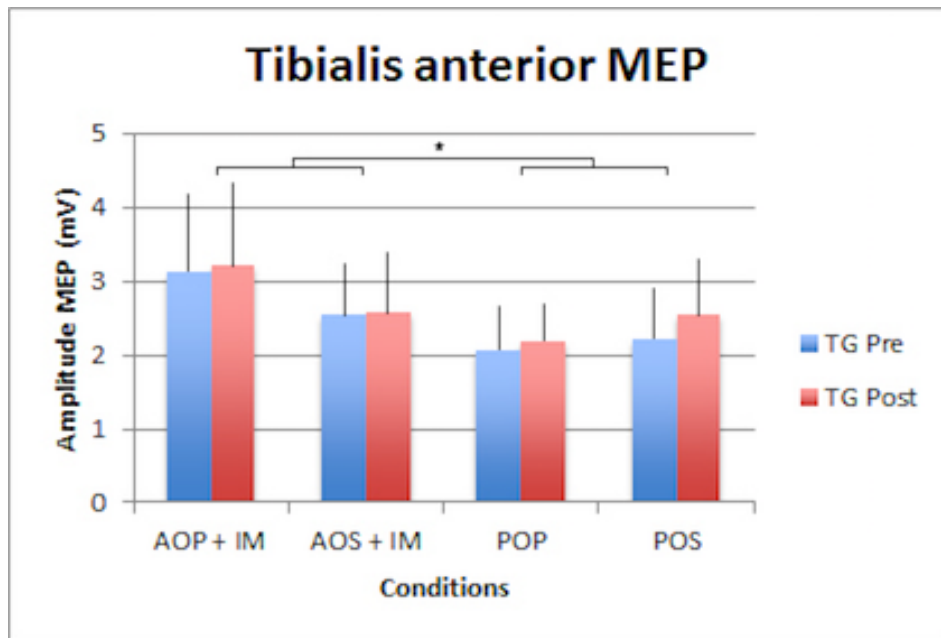


Fig. 10 – Résultats MEP des tests groupe entraînement

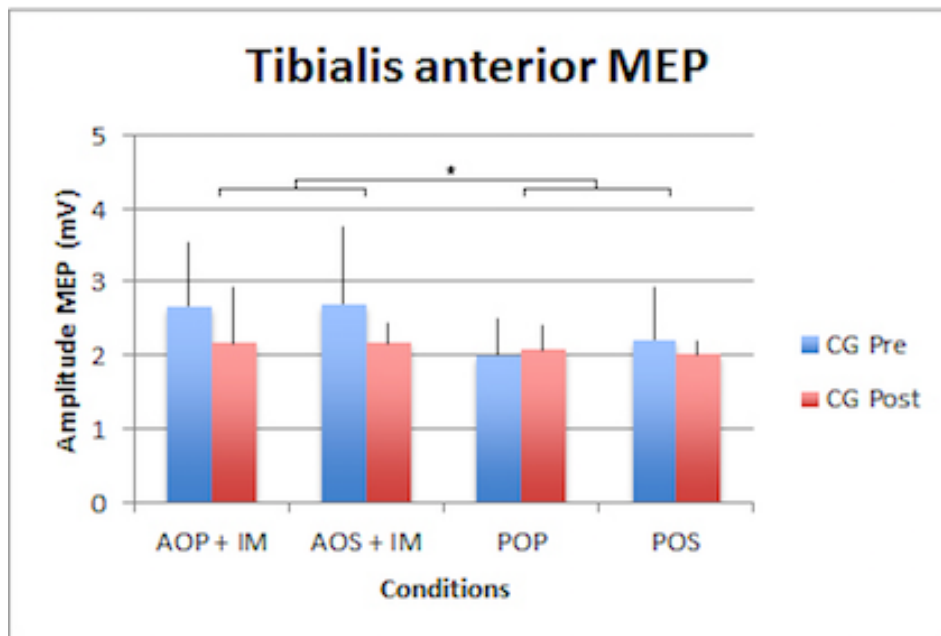


Fig. 11 – Résultats MEP des tests groupe contrôle

### 3.3 Différences entre les groupes au niveau du SICI

#### 3.3.1 Gastrocnemius

Nous pouvons observer un effet significatif sur les graphiques (Fig. 12 et 13) pour le facteur de temps ( $F_{1,23} = 5.3$  ;  $p = 0.03$ ), ce qui nous indique qu'il y a une différence significative entre le pré-test et le post-test dans le résultat des sujets. Un autre effet significatif est à relever au niveau des conditions mentales ( $F_{1,23} = 3.1$  ;  $p = 0.03$ ), ce qui signifie qu'il y a une différence au niveau de la modulation du SICI entre les conditions mentales. Il en va de même pour le facteur de la posture ( $F_{1,23} = 2.2$  ;  $p = 0.0068$ ) qui a un effet significatif sur les participants à l'étude. Ce résultat met en évidence qu'il y a une différence d'effet suffisamment grande chez les sujets entre la posture statique et dynamique pour qu'elle soit significative. Nous avons aussi observé qu'un effet significatif résulte de l'interaction entre le facteur de groupe et de temps ( $F_{1,23} = 5.8$  ;  $p = 0.02$ ). Cela nous révèle qu'il y a une différence de groupe entre les mesures du pré-test et celles du post-test. Les résultats qui n'ont pas été présentés dans cette partie sont ressortis non significatifs de l'analyse.

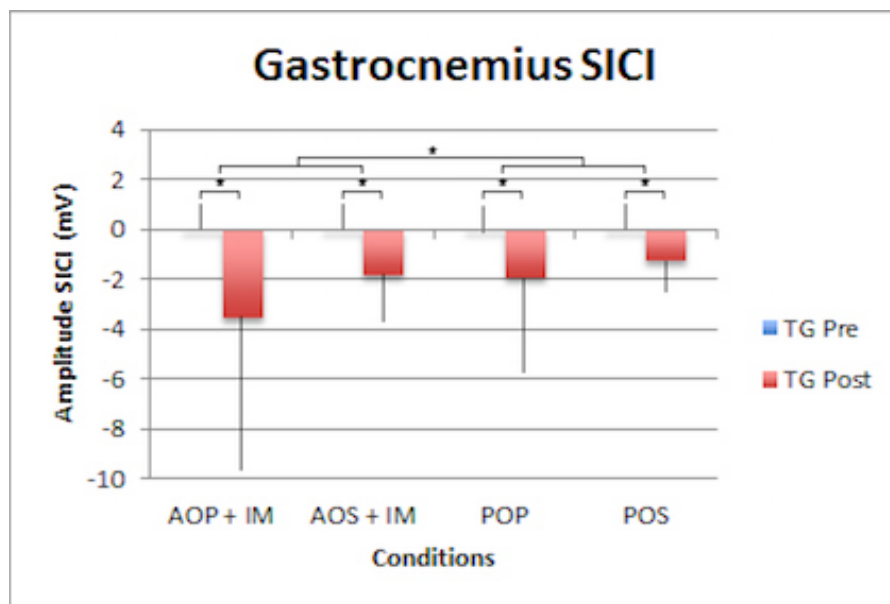


Fig. 12 – Résultats SICI des tests groupe entraînement

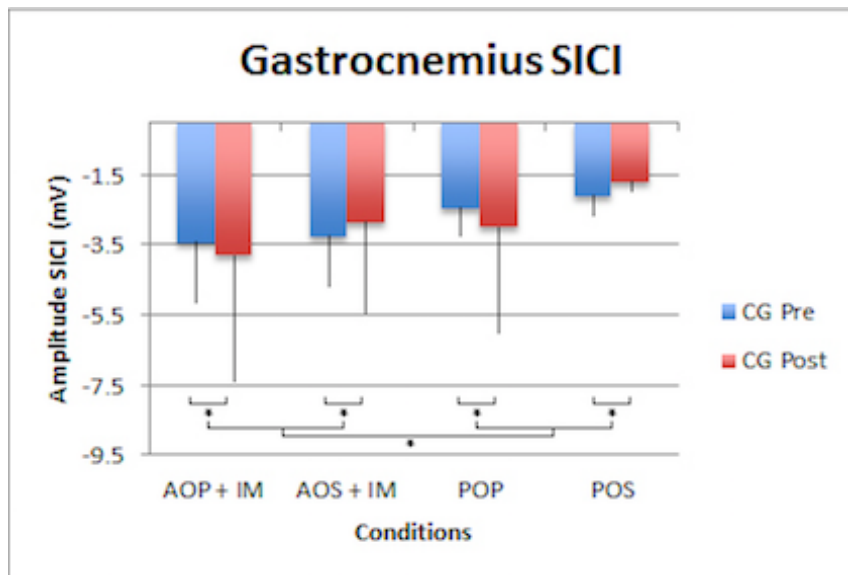


Fig. 13 – Résultats SICI des tests groupe contrôle

### 3.3.2 Soleus

Les résultats (Fig. 14 et 15) démontrent que les conditions mentales ( $F_{1,23} = 6.9$  ;  $p = 0.044$ ) ont un effet significatif sur les modulations du SICI. Il y a une différence significative entre les conditions mentales dans les modulations du SICI. Il en va de même pour la posture ( $F_{1,23} = 5.8$  ;  $p = 0.031$ ). Ce facteur produit une modulation du SICI. Il y a une différence significative entre les postures dans la modulation du SICI. La modulation du SICI est donc aussi sensible aux postures apparaissant dans les tests.

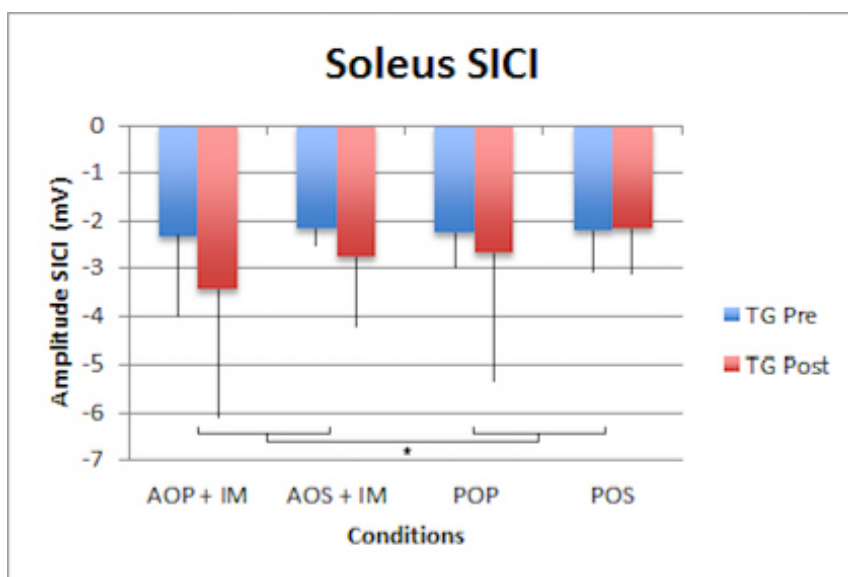


Fig. 14 – Résultats SICI des tests groupe entraînement

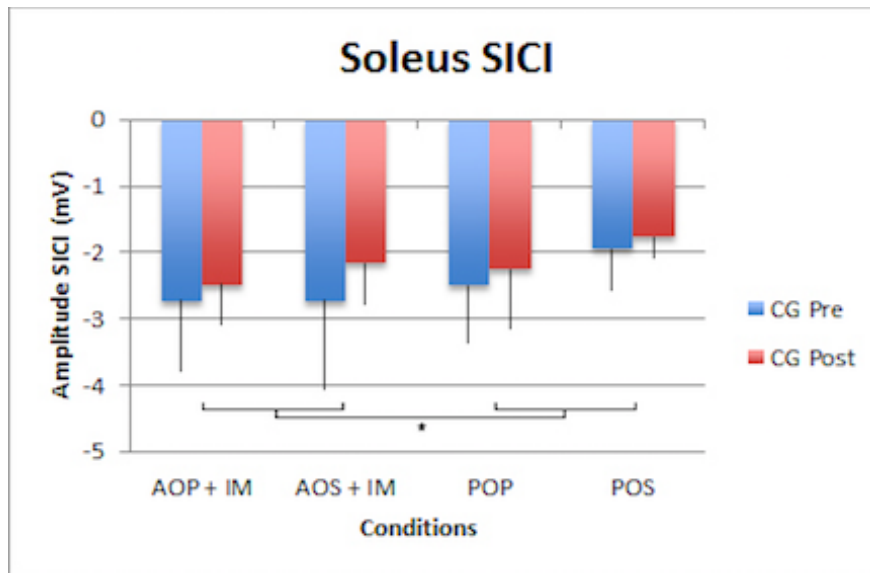


Fig. 15 – Résultats SICI des tests groupe contrôle

### 3.3.3 Tibialis anterior

Nous pouvons observer une interaction significative entre les groupes et le temps ( $F_{1,23} = 2.4$  ;  $p = 0.022$ ), cela nous indique qu'il y a une différence qui n'est pas due au hasard parmi les deux groupes entre le pré-test et le post-test. Pour le tibialis anterior, cette interaction est le seul élément significatif ressortant de l'analyse, tous les autres facteurs ou interactions sont non significatifs et ne ressortent donc pas dans les graphiques des résultats (Fig. 16 et 17).

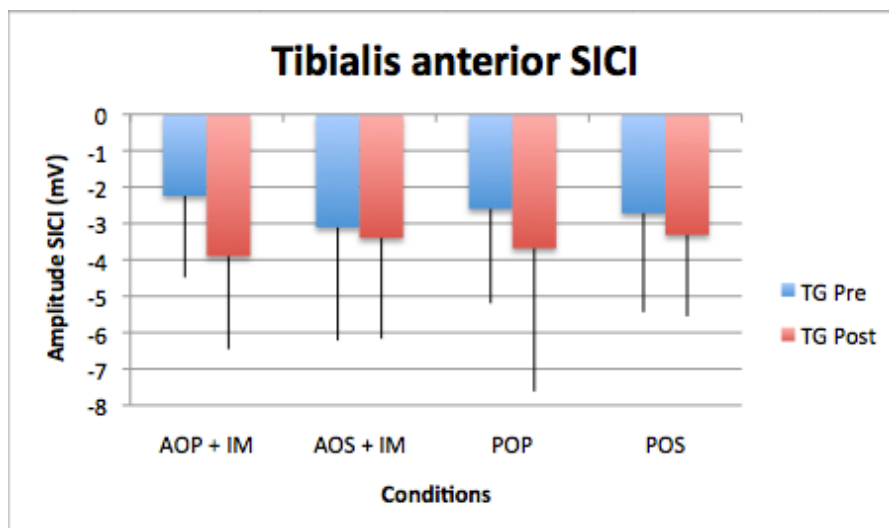


Fig. 16 – Résultats SICI des tests groupe entraînement

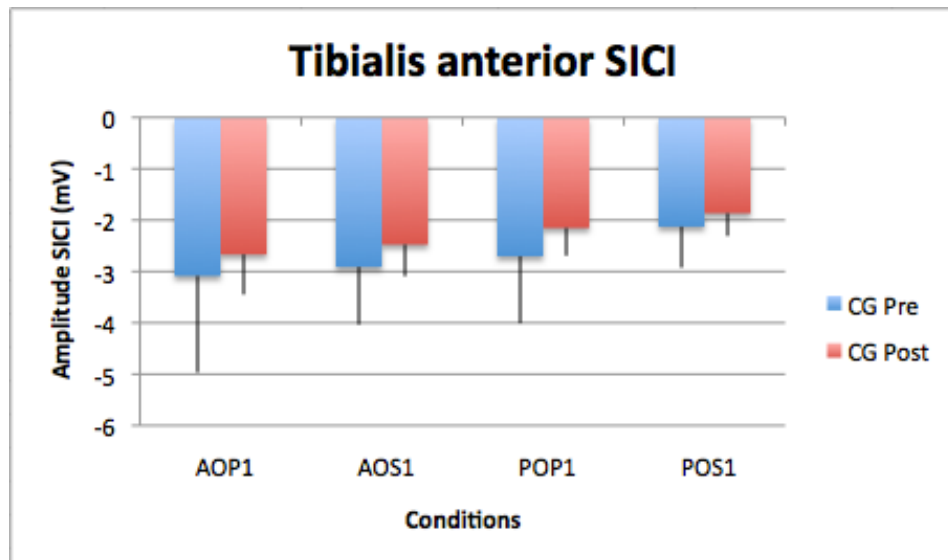


Fig. 17 – Résultats SICI des tests groupe contrôle

## **4 Discussion et conclusion**

Le but de cette étude était d'essayer de répondre à deux questions de recherches qui étaient de savoir si l'observation et l'imagerie motrice influencent l'inhibition intracorticale et de vérifier si un entraînement de l'équilibre engendre un changement au niveau de processus neurophysiologiques lors de la stimulation mentale. Les hypothèses émises sont qu'il y aurait une augmentation de l'inhibition intracorticale lors d'une tâche d'équilibre facile et une diminution de celle-ci lors d'une tâche d'équilibre difficile. Il faut aussi poser l'hypothèse qu'un entraînement de l'équilibre aurait un effet sur la stimulation mentale des tâches d'équilibre en modulant l'amplitude des MEPs et des SICIs.

Les résultats de cette étude montrent que le type de stimulation mentale et le type de posture influencent de façon significative l'excitation corticospinale, mais aussi l'inhibition intracorticale. De plus, l'étude révèle que l'entraînement physique a eu un effet significatif sur l'inhibition intracorticale et non au niveau de l'excitation corticospinale.

### **4.1 Résultats comportementaux**

Un effet significatif important à signaler concerne la tâche réelle effectuée sur stabilomètre. Nous pouvons de suite observer une différence significative entre le TG et le CG sans prendre en compte le facteur Time. La différence entre les deux groupes n'est donc pas liée au hasard. Il est aussi fort intéressant de constater une augmentation significative de la performance en équilibre pour les deux groupes entre le pré-test et le post-test. Même si les deux groupes ont montré une augmentation de performance en équilibre, les résultats du TG sont nettement meilleurs.

Il est possible que le TG ait développé une habitude à l'imagerie mentale, mais il faut cependant prendre en compte que ce groupe a suivi un entraînement physique sur stabilomètre, ce qui influence sûrement les résultats obtenus par ce groupe. D'ailleurs l'interaction Groupe x Time porte à valider cette hypothèse. En effet la différence significative de performance en équilibre qui ressort de cette interaction entre les deux groupes révèle que l'entraînement physique a joué un rôle prédominant. En effet, cela démontre que l'entraînement physique sur stabilomètre est à l'origine de cette différence de performance entre les deux groupes.

Pour ce qui est du CG, il est possible d'expliquer ces résultats par deux explications. La première est que ce résultat significatif montre un effet d'habitude dû à l'imagerie

mentale. En effet, ce résultat ne peut pas être causé par un effet d'entraînement, car ce groupe n'a effectué que le pré-test et le post-test et non les 6 séances d'entraînement sur stabilomètre. Il est donc envisageable que le visionnage des vidéos durant l'imagerie mentale ait suffi à provoquer une habitude à la tâche d'équilibre sur stabilomètre sans même avoir suivi un entraînement physique. La deuxième possibilité est que le CG ait subi une adaptation rapide à la tâche réelle à exécuter sur le stabilomètre. Il est possible que pour certaines personnes la tâche sur stabilomètre ait été trop facile et que celles-ci se soient améliorées significativement sans même pratiquer un entraînement physique d'équilibre.

A ce stade, il est impossible d'associer ces résultats à l'une ou l'autre explication dans le cadre de cette étude. Cependant, il semble plus probable que la tâche d'équilibre ait été trop facile pour certaines personnes déjà aguerries dans le domaine du sport que les sujets se soient adaptés à la tâche en une séance d'imagerie mentale.

## **4.2 MEP : conditions mentales**

Certaines études ont montré que l'imagerie mentale module l'excitabilité corticospinale (Mouthon et al., 2015; Roosink and Zijdwind, 2010). Clark et al. (2004) ont trouvé des résultats similaires. L'excitation corticale était différente selon que les sujets ont observé la tâche passivement, ont observé la tâche avec le but de la reproduire plus tard ou s'ils ont imaginé la tâche.

Dans notre cas, il y a un effet significatif au niveau des conditions mentales pour les trois muscles utilisés pour les tests (GM, SOL, TA) dans l'excitabilité corticospinale. Le niveau de l'ECS était plus élevé avec la condition AO + IM qu'avec la condition PO seule (Mouthon et al., 2015). Ces résultats sont appuyés par les données fMRI qui démontrent que AO + IM présentent une plus grande activité cérébrale que AO ou PO seule (Macuga and Frey, 2012 ; Nedelko et al., 2012; Berends et al., 2013; Villiger et al., 2013; Vogt et al., 2013). Pour le TA, nous remarquons aussi une interaction positive Time x Mental. Cela montre qu'il y a eu une différence entre les conditions mentales du pré-test et celles du post-test pour les deux groupes. Cependant, il n'y a pas d'interaction Groupe x Time x Mental. Les différences significatives dans les conditions mentales ne sont donc pas dues à l'entraînement, mais probablement à la pratique de l'imagerie mentale.

### **4.3 MEP : posture**

Nous n'observons aucune différence significative au niveau de la posture seule dans aucun des trois muscles. En revanche, pour le soleus et le tibialis anterior, il y a un résultat significatif lorsque la posture est en interaction avec la condition mentale.

Nous remarquons une différence significative dans l'interaction entre la posture et la condition mentale selon le groupe. Pour le TG, l'observation active combinée à une posture dynamique (AOP) donne une excitabilité corticospinale plus grande qu'une observation active combinée à une posture statique (AOS). Cependant, l'observation passive d'une posture statique (POS) a une excitabilité plus grande qu'une observation passive d'une posture dynamique (POP). Alors que pour le CG, c'est le contraire :  $AOP < AOS$  et  $POP > POS$ . Malgré ces résultats, nous supposons quand même, de manière générale, que la posture dynamique montre une excitabilité corticospinale plus grande que la posture statique (Mouthon et al., 2015). Cela est envisageable, car l'effet significatif vient de l'interaction de la condition mentale et de la posture et non de la posture seule. Cela veut dire que la posture et la condition mentale influent l'une sur l'autre, mais que la posture n'a pas donné d'effet significatif seul. En tenant compte d'études déjà faites sur le sujet (Mouthon et al., 2015; Stinear and Byblow, 2004), il est probable que, sans la modulation causée par les différentes conditions mentales, la posture dynamique évoque une amplitude MEP plus grande que la posture statique.

### **4.4 MEP : effets de l'entraînement**

Compte tenu de tous les résultats, nous pouvons affirmer que les modulations de l'excitabilité corticospinale ne sont pas des effets de l'entraînement, car il n'y a pas d'interaction Groupe x Time significative. De plus, nous ne remarquons pas non plus d'amélioration significative des résultats entre le pré-test et le post-test, que ce soit pour le CG ou le TG. Seul le gastrocnemius a eu une différence significative entre le pré-test et le post-test, mais on ne peut pas vraiment dire à quoi elle est due. On ne peut pas dire avec certitude qu'est-ce qui est à l'origine des différences significatives observées. Il y aurait pu avoir un effet d'habituation à l'imagerie mentale de la part des deux groupes dans les tâches demandées, ce que tendrait à expliquer le fait qu'il y ait eu une différence significative au niveau des conditions mentales, mais rien n'est sûr.

Certaines études (Hardy & Callow, 1999; Isaac, 1992; Mahoney & Avenier, 1977) ont montré que l'augmentation de la performance due à l'imagerie mentale n'intervient seulement à partir d'un certain niveau d'expertise dans le mouvement ou la série de

mouvements demandé. Dans l'étude présente, on observe une augmentation de l'excitabilité corticospinale pour les observations passives et actives dans le groupe entraînement, même si cette augmentation n'est significative que pour le tibialis anterior. Par contre pour le groupe contrôle, nous observons une diminution de l'excitabilité corticospinale pour les AO et PO. De même, ce constat n'est significatif que pour le tibialis anterior. Les résultats collent avec notre hypothèse de base et le TG a vu sa performance sur stabilomètre augmentée significativement. De plus, même si le CG a aussi augmenté sa performance, elle reste significativement plus faible que celle du TG. Il est probable qu'avec l'entraînement d'équilibre suivi par le TG, cette augmentation de l'excitabilité corticospinale dans le TA soit due au fait que les sujets de ce groupe ont atteint un niveau d'expertise suffisant pour que leurs résultats se distinguent significativement des résultats du CG. Mais de manière générale, l'entraînement n'a pas vraiment eu d'effet au niveau de l'ECS.

#### **4.5 MEP : différences entre les muscles**

Il a aussi été remarqué certaines différences et certaines similitudes entre les trois muscles testés. Le plus marquant est que les mêmes résultats significatifs ressortent du soleus et du tibialis anterior, sauf pour un résultat. D'ailleurs ces similitudes sont parfaitement observables sur les graphiques des résultats. Il est possible que cela s'explique par le fait que le soleus est un muscle avec des fonctions déjà définies, car c'est un muscle antigravitaire. Son rôle est d'assurer l'équilibre du corps. Vu que les tests de l'étude sont portés sur l'équilibre, il n'est pas anormal que les changements significatifs ne se soient pas faits en augmentant l'excitation corticospinale (facilitation), car le muscle n'a pas besoin d'apprendre son rôle dans la tâche d'équilibre demandée, le fait d'être un muscle antigravitaire suffit pour assurer le maintien de l'équilibre dans les tâches à effectuer. L'amélioration s'est donc faite au niveau des conditions mentales et de la posture. Ces résultats sont probablement dus à la nature phasique de certaines tâches demandées comme l'ont relevé Cathy M. Stinear et Byblow (2004). Le tibialis anterior n'est pas un muscle antigravitaire comme le soleus, mais c'est un muscle avec une fonction définie dans le maintien de l'équilibre du corps. Son rôle n'est pas autant important que celui du soleus, mais il est l'antagoniste du soleus et du gastrocnemius. De ce fait, comme le soleus, sa fonction ne peut pas énormément évoluer, même avec l'entraînement physique d'équilibre et l'imagerie motrice, vu que les tâches demandées sont quasi similaires à l'action que le muscle effectue quotidiennement. Pour le gastrocnemius, il n'est pas non plus surprenant qu'il ait été le seul muscle ayant été influencé par l'entraînement. Il ne fait pas partie des

muscles antigravitaires et n'a donc pas de rôle défini comme pour le soleus dans le maintien de l'équilibre du corps. L'entraînement physique d'équilibre a dû l'influencer et induire une facilitation pour des tâches dans lesquelles il n'était pas spécialement impliqué. Le cortex, en réorganisant les fonctions du gastrocnemius pour le rendre plus performant dans les tâches d'équilibre demandées par l'étude, a donc permis au gastrocnemius d'apprendre à effectuer de nouvelles tâches, contrairement au soleus, ce qui expliquerait le résultat significatif de l'entraînement sur ce muscle.

## **4.6 ICI**

Etudier les mécanismes inhibiteurs au niveau intracortical durant des simulations mentales est un domaine relativement récent et complexe. Notre étude porte sur les modulations de l'inhibition intracortical lors de simulations de tâches d'équilibre, qui est une première sur ce sujet. Dans cette partie du travail, nous allons souvent nous référer ou nous comparer à l'étude de Stinear et Byblow (2004), qui est la seule véritable étude concernant, en partie, l'inhibition intracortical durant l'imagerie mentale. Cette étude porte sur l'excitation corticospinale et sur les mécanismes inhibiteurs durant des tâches de performance imaginées. Mais contrairement à notre étude, Stinear et Byblow (2004) ne comparent pas différentes conditions mentales entre elles, mais comparent les effets d'une tâche facile ou complexe dans la simulation mentale.

La première expérience consistait en trois types d'essais : tâche de performance physique, tâche imaginée et la tâche contrôle. Les sujets devaient appuyer avec leur index dominant sur un bouton en mousse, produisant du son, en rythme avec un métronome.

Pour la deuxième expérience, une trace représentant l'activité EMG de leur APB et deux lignes horizontales traduisant 5% et 20% de leur MVC ont été présentées aux sujets. Les sujets devaient activer leur muscle APB à un niveau se trouvant entre ces deux lignes.

L'Expérience 1 ne donne rien de concluant. Cependant, l'expérience 2 présente une modulation claire de l'excitabilité corticospinale durant des tâches phasiques. Tout d'abord il y a une augmentation significative de l'excitabilité corticospinale durant la phase d'IM concernant l'APB. Les instructions sur l'IM reçues par les sujets de s'imaginer chaque tâche avec la même force que celle utilisée dans l'exécution réelle de la tâche ont dû contribuer à la modulation de l'amplitude des MEPs. L'ICI de l'APB est significativement plus petit durant la phase « on » de la tâche de performance IM en miroir que durant la phase « off ». La modulation spatiale et temporelle de l'ICI de l'APB suggère que l'ICI peut être modulée de manière similaire durant l'IM de tâches phasiques imaginées que durant la tâche de

performance réelle, mais sûrement avec un niveau inférieur de résolution spatiale lors de l'imagerie motrice.

#### **4.7 SICI : conditions mentales**

Nous pouvons observer une différence significative au niveau des conditions mentales pour le soleus et le gastrocnemius, que ce soit pour le groupe entraînement ou le groupe contrôle. Indépendamment de la posture, nous remarquons que les observations actives (AO) donnent une inhibition intracorticale plus petite que pour les observations passives (PO). Il apparaît que les tâches complexes et l'imagerie mentale nécessitent une diminution de l'inhibition intracorticale pour pouvoir effectuer de façon optimale les tâches demandées. Ces résultats peuvent être complémentaires avec ceux de Stinear et Byblow (2004), qui ont montré une diminution de l'ICI durant la phase « on » (IM) que durant la phase « off ». Cette étude compare des tâches complexes et faciles lors de simulation, mais non des conditions mentales comme pour notre étude. Néanmoins, le fait que les tâches complexes montrent un ICI plus petit que dans les tâches simples indique que nos résultats vont dans le même sens. Cette diminution indique que le cortex a besoin de plus de ressources pour les tâches complexes d'équilibre que pour les tâches simples afin que le traitement des informations sensorielles, la programmation du mouvement et l'exécution du mouvement soient parfaitement menés. Au contraire, les tâches moins complexes (PO) ne demandent pas autant de ressources et ont montré une inhibition intracorticale plus importante. Il est donc clair que la modulation du SICI, respectivement l'augmentation ou la diminution de l'inhibition intracorticale, se fait en partie par le type de conditions mentales demandées durant la tâche d'équilibre.

#### **4.8 SICI : posture**

Après avoir remarqué que la modulation du SICI se fait en partie par les différentes conditions mentales, nous observons aussi que l'inhibition intracorticale est modulée par les différentes postures (P ou S) durant les différentes tâches à effectuer. Contrairement à ce que nous avons pu voir au niveau des résultats MEP, il n'y a pas besoin de l'interaction entre les conditions mentales et les postures pour qu'il y ait une modulation significative de l'inhibition intracorticale. Le facteur « Posture » suffit à lui seul pour influencer la modulation de façon assez importante pour donner une différence significative entre les différentes postures demandées durant le pré-test et le post-test. Notons que les résultats sont

significatifs pour le gastrocnemius et le soleus, mais pas pour le tibialis anterior. Que ce soit le TG ou le CG, les postures statiques présentent une inhibition intracorticale plus grande que pour les postures dynamiques effectuées dans les différentes tâches. Ce constat est similaire aux résultats obtenus dans l'étude de Mouthon et al. (2015). L'étude de Stinear et Byblow (2004) soutient aussi les résultats trouvés, car leur étude montre que c'est la nature phasique de la tâche qui module le SICI, c'est-à-dire que les tâches complexes vont montrer une inhibition intracorticale plus petite que pour les tâches simples, non phasiques. Ces résultats sont en contrastes avec une étude (Ridding and Rothwell 1999) ne montrant aucune modulation de l'ICI durant une tâche isométrique « pinch grip ». Comme le dit Stinear et Byblow (2004), les différences de résultats sont probablement dues à la nature des tâches à effectuer. En effet, l'étude de Stinear et Byblow (2004) et la nôtre utilisent des tâches phasiques alors que l'étude de Ridding et Rothwell (1999) utilise une tâche isométrique. Mais ces différences peuvent aussi être dues, en partie, au réglage des appareils utilisés. Les tâches effectuées en visionnant les postures dynamiques demandent plus de ressources pour être traitées par le cortex moteur que les postures statiques. Le traitement des informations sensorielles, la programmation et l'exécution d'une tâche complexe nécessiteront de plus grandes ressources que pour une tâche simple. La conséquence est une plus petite inhibition pour une excitabilité corticospinale augmentée. A noter, même si ces résultats ne sont pas ressortis significatifs de l'analyse, l'effet d'inhibition est plus grand dans le groupe entraînement que dans le groupe contrôle.

#### **4.9 SICI : effets de l'entraînement**

L'effet de l'entraînement physique de l'équilibre est perceptible seulement pour le tibialis anterior et le gastrocnemius, mais non pour le soleus. En effet l'interaction Time x Groupe indique qu'il y a une différence significative de groupe entre le pré-test et le post-test. Les effets de l'entraînement engendrent une diminution de l'inhibition intracorticale lors de la simulation mentale, alors que le groupe contrôle démontre une augmentation de l'inhibition intracorticale. Ce résultat va dans le même sens que les résultats trouvés dans l'étude de Stinear et Byblow (2004) qui porte sur l'effet de l'entraînement physique et l'imagerie mentale. Leurs résultats indiquent une inhibition intracorticale moins grande durant la phase « on » (IM) que pendant la phase « off » pour l'APB, ce qui montre une modulation du SICI selon la difficulté des tâches à effectuer. D'ailleurs une des hypothèses de base de notre étude était que les tâches difficiles demanderaient une inhibition intracorticale plus petite que pour les tâches faciles.

Il est probable que la baisse d'inhibition pour le groupe entraînement soit due à l'entraînement physique d'équilibre qu'ils ont suivi. Il a dû y avoir un effet de facilitation pour les tâches demandées causé par l'entraînement, car le cortex demande beaucoup de ressources pour traiter ce que l'entraînement apporte comme expérience et adapter les mouvements utilisés dans les tâches d'équilibre aux informations sensorielles venant de l'entraînement. Donc l'excitation corticospinale a augmenté et les mécanismes d'inhibition pour ces mouvements ont été atténués. L'entraînement physique a sûrement dû augmenter la participation du tibialis anterior et du gastrocnemius dans le maintien de l'équilibre du corps pour le TG. Le cortex moteur a dû entamer une réorganisation dans le schéma d'exécution de ce type de mouvements, ce qui expliquerait la diminution de l'inhibition intracorticale.

Pour l'augmentation de l'inhibition du groupe contrôle, il est probable que le fait de ne pas avoir suivi d'entraînement physique d'équilibre joue un rôle dans les résultats. Il est possible qu'en pratiquant l'imagerie motrice seule, le cortex moteur a effectué une sélectivité des muscles impliqués dans les tâches d'équilibre demandées dans l'étude. C'est-à-dire qu'en s'imaginant faire le mouvement tout en l'observant, le cortex moteur excite les muscles les plus utilisés lors des tâches d'équilibre et inhibe partiellement les muscles moins sollicités dans ce genre de mouvements, voir inhibe totalement les muscles inutiles au maintien de l'équilibre. Le tibialis anterior et le gastrocnemius étant moins sollicités que le soleus dans le maintien de l'équilibre, le cortex moteur a dû augmenter leur inhibition pour une question ergonomique et rendre le mouvement plus précis.

#### **4.10 SICI : différences entre les muscles**

Certaines différences et certaines similitudes entre les trois muscles ressortent. Le soleus et le gastrocnemius ont tous deux une modulation du SICI causée par la condition mentale et la posture, indépendamment l'une de l'autre. La modulation de ces deux muscles traduit une diminution de l'inhibition intracorticale.

Les conditions mentales et la posture ont dû influencer la fonction de base du soleus qui est un muscle antigravitaire responsable du maintien de l'équilibre du corps. Etant donné qu'il est un muscle antigravitaire, sa fonction dans le maintien de l'équilibre du corps est définie. Mais avec l'influence de l'imagerie motrice, sa fonction dans le maintien de l'équilibre du corps s'est probablement adaptée aux différents changements induits par les différentes conditions mentales et postures imposées aux sujets pendant l'imagerie mentale pour améliorer spécifiquement la posture du corps aux tâches d'équilibre demandées. Les différences significatives traduisent probablement cela. Le cortex a dû entamer une

réorganisation des fonctions de base du soleus dans le maintien de l'équilibre induit par l'imagerie mentale et mis en pratique par l'entraînement physique pour le TG. Ces changements se traduisent, rappelons-le, par une diminution de l'inhibition de la part du groupe entraînement et par une augmentation de l'inhibition pour le groupe contrôle. Les différences de modulation entre les deux groupes traduisent les effets de l'entraînement physique, comme dit plus haut.

Le SICI du gastrocnemius est également modulé par la condition mentale et la posture, mais il a également une différence significative au niveau du temps et de l'interaction Time x Groupe. C'est-à-dire qu'il y a une différence dans les résultats entre le pré-test et le post-test, mais qu'il y a aussi une différence entre les groupes dans l'évolution des résultats. Comme dit plus haut, l'entraînement physique de l'équilibre a eu un effet significatif sur ce muscle. Il est probable que les résultats significatifs concernant les conditions mentales et la posture soient dus à la même raison que le soleus. Le gastrocnemius n'est pas autant impliqué que le soleus dans le maintien de l'équilibre et il a été influencé par les conditions mentales et la posture durant la simulation des tâches d'équilibre. Il a sûrement subi une réorganisation de ses fonctions, traduite par une différence significative dans les conditions mentales et la posture, en vue de mieux effectuer les tâches d'équilibre demandées durant l'étude. L'imagerie mentale a dû lancer la réorganisation des fonctions du gastrocnemius et l'entraînement physique a servi à mettre cela en pratique pour le TG.

Le SICI du tibialis anterior n'est pas modulé de façon significative au niveau des conditions mentales et de la posture comme pour les deux autres muscles. Son rôle dans le maintien de l'équilibre ne devait soit ne pas être assez important pour être adapté et influencé par les conditions mentales et la posture, soit sa fonction de base suffisait pour remplir les tâches d'équilibre demandées, il n'a donc pas eu besoin de s'adapter. Le fait que ce muscle ait un effet significatif dû à l'entraînement montre qu'il présente une augmentation de l'excitation pour le groupe entraînement et une augmentation de l'inhibition intracorticale pour le groupe contrôle, mais que ces effets sont seulement liés à l'entraînement et non aux conditions mentales et à la posture. Cela traduit sûrement une facilitation dans l'exécution des tâches d'équilibre causée par l'entraînement physique.

## Conclusion

Il a déjà été démontré qu'un entraînement d'équilibre par observation ou par imagerie mentale augmente la performance en équilibre (Keller et al. 2014). Il est aussi connu que ce phénomène est traduit par l'activation des régions du cerveau impliquées dans le contrôle de l'équilibre (Ouchi et al., 1999; Taube et al., 2015) et par l'augmentation de l'excitabilité du système corticospinal durant l'observation et l'imagerie motrice des tâches posturales (Mouthon et al., 2015). Papegaaij et al. (2014) ont aussi mis en évidence que les mécanismes inhibiteurs ont un rôle dans les exercices physiques d'équilibre.

Cette étude montre que l'entraînement physique de l'équilibre a un effet au niveau de la modulation du SICI, mais pas au niveau de l'ECS. L'inhibition intracorticale a diminué dans le TG, ce qui traduirait une facilitation de certains muscles pour effectuer les tâches d'équilibre, alors qu'elle a augmenté dans le CG.

L'étude montre aussi que l'excitation corticospinale est modulée par les conditions mentales et les postures. AO + IM donnent une excitation corticospinale plus conséquente que PO. Les résultats indiquent aussi que les tâches complexes (P) en équilibre tendent à exprimer une excitation corticospinale plus importante que les tâches simples (S). Ces résultats soutiennent ce qui a déjà été démontré par plusieurs études (Mouthon et al., 2015 ; Roosink et Zijdwind, 2010). L'entraînement physique suivi par le TG n'a pas eu d'effet significatif au niveau de l'excitation corticospinale.

Pour ce qui est des mécanismes inhibiteurs, l'étude prouve que l'amplitude du SICI est modulée de façon significative par les conditions mentales et également par la posture durant des tâches d'équilibre, sans interaction entre les deux. L'inhibition intracorticale est plus importante pour les tâches simples que pour les tâches complexes. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Stinear et Byblow (2004) dans la deuxième expérience portant sur l'APB, la seule étude faite sur les mécanismes inhibiteurs durant l'imagerie mentale.

En tenant compte des similitudes et des différences entre notre travail et d'autres études faites sur le sujet, l'on peut dire que la nature phasique des tâches et les conditions mentales demandées durant la tâche jouent un rôle important dans l'augmentation et la diminution de l'inhibition intracorticale lors des simulations de tâches d'équilibre. L'étude a aussi montré une influence significative de l'entraînement physique d'équilibre sur l'inhibition intracorticale. Le TG a vu son inhibition diminuée alors que le CG a observé une augmentation de l'inhibition intracorticale.

Le rôle des mécanismes inhibiteurs lors de la simulation mentale de différentes tâches commence tout juste à être exploré, mais il est sûr que de plus en plus d'études vont se

pencher sur les mécanismes inhibiteurs dans la simulation mentale, car il reste énormément de choses à découvrir dans ce domaine de la neurophysiologie.

## Bibliographie

Abbruzzese, G., Trompetto, C., and Schieppati, M. (1996). The excitability of the human motor cortex increases during execution and mental imagination of sequential but not repetitive finger movements. *Exp. Brain Res*, 111, 465–472.

Annett, J. (1995). Imagery and motor processes: Editorial overview. *Br. J. Psychol*, 86, 161–167.

Barr, K., & Hall, C. R. (1992). The use of imagery by rowers. *International Journal of Sport Psychologist*, 23, 243-261.

Beck, S., Taube, W., Gruber, M., Amtage, F., Gollhofer, A., & Schubert, M. (2007). Task-specific changes in motor evoked potentials of lower limb muscles after different training interventions. *Brain Research*, 1179, 51-60.

Berends, H. I., Wolkorte, R., Ijzerman, M. J., and Putten, M. J. A. M. van (2013). Differential cortical activation during observation and observation-and-imagination. *Exp. Brain Res*, 229, 337–345.

Bonnet, M., Decety, J., Jeannerod, M., and Requin, J. (1997). Mental simulation of an action modulates the excitability of spinal reflex pathways in man. *Brain Res. Cogn. Brain Res*, 5, 221–228.

Boschker, M. (2001). *Action-based imagery: On the nature of mentally imagined motor actions* (doctoral thesis). Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands: Ipskamp PrintPartners.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R. J., Zilles, K., Rizzolatti, G., and Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur. J. Neurosci*, 13, 400–404.

Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H.-J., and Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron*, 42, 323–334.

- Clark, S., Tremblay, F., and Ste-Marie, D. (2004). Differential modulation of corticospinal excitability during observation, mental imagery and imitation of hand actions. *Neuropsychologia*, 42, 105–112.
- Decety, J., and Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain Cogn*, 11, 87–97.
- Decety, J., and Grèzes, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends Cogn. Sci.*, 3, 172–178.
- Driskell, J., E., Cooper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, 79, 481-492.
- Ehrsson, H. H., Geyer, S., and Naito, E. (2003). Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations. *J. Neurophysiol.*, 90, 3304–3316.
- Fadiga, L., Buccino, G., Craighero, L., Fogassi, L., Gallese, V., and Pavesi, G. (1998). Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia*, 37, 147–158.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., and Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *J. Neurophysiol*, 73, 2608–2611.
- Feltz, D. L., & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : A meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, 5, 25-57.
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Learning and skilled performance in human performance*. Belmont CA: Brock-Cole.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., and Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain J. Neurol*, 119 (Pt 2), 593–609.
- Gerardin, E., Sirigu, A., Lehericy, S., Poline, J. B., Gaymard, B., Marsault, C., Agid, Y., and Le Bihan, D. (2000). Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cereb. Cortex N. Y. N 1991*, 10, 1093–1104.

- Grezes, J., & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping, 12*(1), 1-19.
- Gruber M., Gollhofer A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur J Appl Physiol, 92*, 98 - 105.
- Gruber M., Gruber S. B., Taube W., Schubert M., Beck S. C., Gollhofer A. (2007). Differential effects of ballistic versus sensorimotor training on rate of force development and neural activation in humans. *J Strength Cond Res, 21*, 274 - 282.
- Guillot, A., Collet, C. (2010). *The Neurophysiological Foundations of Mental and Motor Imagery*. OUP Oxford
- Hall, C. R. (2001). Measurement Imagery Abilities and Imagery Use. *Advances in Sport and Exercise Psychology Measurement. Purdue University Editor, 9*, 165-172.
- Hall, C. R., Bernoties, L., & Schmidt, D. (1995). Interference effects of mental imagery on a motor task. *Brain Journal of Psychology, 86*, 181-190.
- Hall, C. R., Buckolz, E., & Fishburne, G. J. (1992). Imagery and the Acquisition of Motor Skills. *Canadian Journal of Sport Science, 17*, 1, 19-27.
- Hall, C. R., Pongrac, J., & Buckolz, E. (1985). The measurement of imagery ability. *Human Movement Science, 4*, 107-118.
- Hallett, M., Fieldman, J., Cohen, L. G., Sadato, N., & Pascual- Leone, A. (1994). Involvement of primary motor cortex in motor imagery and mental practice. *Journal of Behavioral and Brain Science, 17*, 210.
- Hamel, M. F., and Lajoie, Y. (2005). Mental imagery. Effects on static balance and attentional demands of the elderly. *Aging Clin. Exp. Res., 17*, 223–228.
- Hardy, L. (1997). The Coleman Roberts Griffith address: Three myths about applied consultancy during motor imagery. *Journal of Physiological and Anthropological Applications to Human Science, 19*, 255-261.

- Hardy, L., & Callow, N. (1999). Efficacy of external and internal visual imagery perspectives for the enhancement of performance on tasks in which form is important. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 21, 95-112
- Higuchi, S., Holle, H., Roberts, N., Eickhoff, S. B., and Vogt, S. (2012). Imitation and observational learning of hand actions: prefrontal involvement and connectivity. *NeuroImage*, 59, 1668–1683.
- Holmes, P. S. and Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery : a functional équivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology*, 13, 60-83.
- Ingvar, D. H., and Philipson, L. (1977). Distribution of cerebral blood flow in the dominant hemisphere during motor ideation and motor performance. *Ann. Neurol.*, 2, 230–237.
- Isaac, A. (1992). Mental practice- does it work in the field ? *The Sport Psychologist*, 6, 192-198.
- Jacobson, E. (1932). Electrophysiolgy of mental activities. *American Journal of Psychology*, 44, 677-694.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain. Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 187-245.
- Jeannerod, M. (1999). The 25th Bartlett Lecture. To act or not to act: perspectives on the representation of actions. *Q. J. Exp. Psychol. A*, 52, 1–29.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14(1 Pt 2), S103-S109.
- Kean, C. O., Behm, D. G., Young, W. B. (2006). Fixed foot balance training increases rectus femoris activation during landing and jump height in recreatio- nally active women. *J Sports Sci Med*, 5, 138 - 148.
- Keller, M., Lauber, B., Gottschalk, M., and Taube, W. (2015). Enhanced jump performance when providing augmented feedback compared to an external or internal focus of attention. *J. Sports Sci.*, 33, 1067–1075.

- Kimberley, T. J., Khandekar, G., Skraba, L. L., Spencer, J. A., Van Gorp, E. A., & Walker, S. R. (2006). Neural substrates for motor imagery in severe hemiparesis. *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 20(2), 268-277.
- Koski, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Woods, R. P., and Mazziotta, J. C. (2003). Modulation of cortical activity during different imitative behaviors. *J. Neurophysiol.*, 89, 460–471.
- Kosslyn S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Perception and Psychophysics*, 14, 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and Mind*. Harvard University Press, Cambridge MA.
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 47-60.
- Kujirai, T., Caramia, M. D., Rothwell, J. C., Day, B. L., Thompson, P. D., Ferbert, A., Wroe, S., Asselman, P., and Marsden, C.D. (1993). Corticocortical inhibition in human motor cortex. *J. Physiol.*, 471, 501–519.
- Lang, P.J. (1979). Presidential address, 1978. A bio-informational theory of emotional imagery. *Psychophysiology*, 16, 495–512.
- Lang, P. J. (1985) The cognitive psychophysiology of emotion: Fear and anxiety. In A.H. Tuma and J.D. Maser (Eds.), *Anxiety and the anxiety disorders*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp. 131-170.
- Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hulsmann, E., Flor, H., Klose, U., et al. (1999). Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(5), 491e501
- Macuga, K. L., and Frey, S. H. (2012). Neural representations involved in observed, imagined, and imitated actions are dissociable and hierarchically organized. *NeuroImage*, 59, 2798–2807.
- Magill, R.A. (1998). Knowledge is more than we can talk about: implicit learning in motor skill acquisition. *Res. Q. Exerc. Sport*, 69, 104–110.

Mahoney, M. J., & Avenier, M. (1977). Psychology of the elite athlete : An exploratory study. *Cognitive Therapy Research, 1*, 135-141.

McCullagh, P. and Weiss, M.R. (2002). Observational learning. The forgotten psychological method in sport psychology, in Van Raalte, J.L. and Brewer, B.W. (eds), *Exploring Sport and Exercise Psychology*. 2<sup>nd</sup> Edition. pp. 131-150. Washington, D.C. : American Psychologist Association.

McCullagh and Weiss, M.R. (2001). Modeling : considerations for motor skill performance and psychological responses, in R.N. Singer, H.A. Hausenblas, and C.M. Janelle (eds), *Handbook of Sport Psychology*. 2<sup>nd</sup> Edition. pp. 205-238. New York : Wiley.

McIntyre, T., Moran, A. (1996). *Imagery Use Among Canoeists: A worldwide Survey of Non-elite and Elite Slalomists*. 27<sup>th</sup> Annual Conference, Psychological Society of Ireland, Watford.

Montoya, P., Lotze, M., Grodd, W., et al. (1998). *Brain activation during executed and imagined movements using fMRI*. Paper presented at the 3rd European Congress of Psychology : Konstanz.

Moritz, S. E., Hall, C. R., Martin, K. A., & Vadocz, E. A. (1996). What are confident athletes Imagining ? An examination of image content. *The Sport Psychologist, 10*, 171–179.

Morris, T., Spittle, M., and Watt, A. P. (2005). *Imagery in Sport*. Champaign, IL : Human Kinetics.

Mouthon, A., Ruffieux, J., Wälchli, M., Keller, M., and Taube, W. (2015). Task-dependent changes of corticospinal excitability during observation and motor imagery of balance tasks. *Neuroscience, 303*, 535–543.

Mumford, B., & Hall, C. R. (1985). The effects of internal and external imagery on performing figures in figure skating. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 10*, 171-177.

Murphy, S., and Cumming, J. (2008). Imagery in sport, exercise and dance, in T. Horn (ed.), *Advances in Sport Psychology*. Champaign, IL : Human Kinetics

- Nedelko, V., Hassa, T., Hamzei, F., Schoenfeld, M. A., and Dettmers, C. (2012). Action imagery combined with action observation activates more corticomotor regions than action observation alone. *J. Neurol. Phys. Ther. JNPT*, 36, 182–188.
- Neuper, C., Scherer, R., Reiner, M., & Pfurtscheller, G. (2005). Imagery of motor actions: differential effects of kinesthetic and visual-motor mode of imagery in single-trial EEG. *Cognitive Brain Research*, 25(3), 668-677.
- Oishi, K., Kimura, M., Yasukawa, M., Yoneda, T., and Maeshima, T. (1994). Amplitude reduction of H-reflex during mental movement simulation in elite athletes. *Behav. Brain Res.*, 62, 55–61.
- Ouchi, Y., Okada, H., Yoshikawa, E., Nobezawa, S., and Futatsubashi, M. (1999). Brain activation during maintenance of standing postures in humans. *Brain J. Neurol.*, 122 (Pt 2), 329–338.
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychology Review*, 76, 241-263.
- Paivio, A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Paivio, A. (1975). Imagery and Long-term Memory. In A. Kennedy et A. Wilkes (réd.): *Studies in Long-term Memory*. New York: Wiley.
- Paivio, A. (1986). *Mental Representations: A Dual-coding Approach*. New York: Oxford University Press.
- Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentili, R., & Pozzo, T. (2002). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental Brain Research*, 143, 447-452.
- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain : A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80, 1-25.
- Papegaaij, S., Taube, W., Hogenhout, M., Baudry, S., and Hortobágyi, T. (2014). Age-related decrease in motor cortical inhibition during standing under different sensory conditions. *Front. Aging Neurosci.*, 6.

- Ridding, M. C., Rothwell, J. C. (1999). Afferent input and cortical organisation: a study with magnetic stimulation. *Exp Brain Res*, 126, 536–544
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., and Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain research : Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. and Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Review Neuroscience*, 2, 661-670.
- Robin, R. (2005). *Imagerie mentale et performance motrice*. Trav. de dipl. non publié, Université de Poitiers, Faculté des Sciences du Sport.
- Rodgers, W., Hall, C. R., & Buckolz, E. (1991). The effects of an imagery training program on imagery ability, imagery use and figure skating performance. *Journal of Applied Sport Psychology*, 3, 109-125.
- Roos, L., Taube, W., Zuest, P., Clénin, G., and Wyss, T. (2015). Musculoskeletal Injuries and Training Patterns in Junior Elite Orienteering Athletes. *BioMed Res. Int.*, 259531.
- Roosink, M., Zijdwind, I. (2010). Corticospinal excitability during observation and imagery of simple and complex hand tasks: Implications for motor rehabilitation. *Behav. Brain Res.*, 213, 35–41.
- Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., Dittmar, A., and Vernet-Maury, E. (1999). Imagery Quality Estimated by Autonomic Response Is Correlated to Sporting Performance Enhancement. *Physiol. Behav*, 66, 63–72.
- Ryan, E. D, & Simons, J. (1982). Cognitive demand, imagery and frequency of mental rehearsal as factors influencing acquisition of motor skills. *Journal of Sport Psychology*, 3, 35-45.
- Sackett, R. S. (1934). The influences of symbolic rehearsal upon the retention of a maze habit. *Journal of General Psychology*, 10, 376 - 395.
- Savoyant, A. (1986). *Mental Practice : Image and Rehearsal of Motor Action*. Communication à la Table Ronde européenne sur l'imagerie et la cognition. Université de Paris-Sud, Orsay, 1986

- Schubert, M., Beck, S., Taube, W., Amtage, F., Faist, M., and Gruber, M. (2008). Balance training and ballistic strength training are associated with task-specific corticospinal adaptations. *Eur. J. Neurosci.*, 27, 2007–2018.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J. R., Pillon, B., Dubois, B., Agid, Y., et al. (1995). Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *NeuroReport*, 6(7), 997-1001.
- Stephan, K. M., Fink, G. R., Passingham, R. E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A. O., Frith, C. D., et al. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, 73(1), 373-386.
- Stinear, C.M., and Byblow, W.D. (2004). Modulation of corticospinal excitability and intracortical inhibition during motor imagery is task-dependent. *Exp. Brain Res.*, 157, 351–358.
- Strafella, A.P., and Paus, T. (2000). Modulation of cortical excitability during action observation: a transcranial magnetic stimulation study. *Neuroreport*, 11, 2289–2292.
- Szameitat, A. J., Shen, S., and Sterr, A. (2007). Effector-dependent activity in the left dorsal premotor cortex in motor imagery. *Eur. J. Neurosci.*, 26, 3303–3308.
- Taube, W. (2012). Neurophysiological Adaptations in Response to Balance Training. *Dtsch Z Sportmed*, 63, 273-277.
- Taube, W., Bracht, D., Besemer, C., Gollhofer, A. (2010). The Effect of Inline Skating on Postural Control in Elderly People. *Dtsch Z Sportmed*, 61, 45 - 51.
- Taube, W., Gruber, M., Beck, S., Faist, M., Gollhofer, A., and Schubert, M. (2007a). Cortical and spinal adaptations induced by balance training: correlation between stance stability and corticospinal activation. *Acta Physiol. Oxf. Engl.*, 189, 347–358.
- Taube, W., Gruber, M., and Gollhofer, A. (2008). Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training and their functional relevance. *Acta Physiol. Oxf. Engl.*, 193, 101–116.

- Taube, W., Kullmann, N., Leukel, C., Kurz, O., Amtage, F., and Gollhofer, A. (2007b). Differential reflex adaptations following sensorimotor and strength training in young elite athletes. *Int. J. Sports Med.*, 28, 999–1005.
- Taube, W., Schubert, M., Gruber, M., Beck, S., Faist, M., & Gollhofer, A. (2006). Direct corticospinal pathways contribute to neuromuscular control of perturbed stance. *Journal of Applied Physiology*, 101(2), 420-429.
- Taube, W., Lorch, M., Zeiter, S., and Keller, M. (2014). Non-physical practice improves task performance in an unstable, perturbed environment: motor imagery and observational balance training. *Front. Hum. Neurosci.*, 8, 972.
- Taube, W., Mouthon, M., Leukel, C., Hoogewoud, H.-M., Annoni, J.-M., and Keller, M. (2015). Brain activity during observation and motor imagery of different balance tasks: An fMRI study. *Cortex*, 64, 102–114.
- Theios, J. (1975). The components of response latency in simple human information processing tasks. In P. Rabbitt, & S. Dornic (Eds.), *Attention and performance V* (pp. 418-440). London: Academic Press.
- Villiger, M., Estévez, N., Hepp-Reymond, M.-C., Kiper, D., Kollias, S.S., Eng, K., and Hotz-Boendermaker, S. (2013). Enhanced Activation of Motor Execution Networks Using Action Observation Combined with Imagination of Lower Limb Movements. *PLoS ONE*, 8.
- Vogt, S., Di Rienzo, F., Collet, C., Collins, A., and Guillot, A. (2013). Multiple roles of motor imagery during action observation. *Front. Hum. Neurosci.*, 7.
- Watanabe, M., Maemura, K., Kanbara, K., Tamayama, T., and Hayasaki, H. (2002). GABA and GABA receptors in the central nervous system and other organs. *Int. Rev. Cytol.*, 213, 1–47.
- Wrisberg, C. A., & Ragsdale, M. R. (1979). Cognitive demand and practice level: Factors in the mental rehearsal of motor skills. *Journal of Human Movement Studies*, 5, 201-208.
- Yue, G., and Cole, K. J. (1992). Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J. Neurophysiol.*, 67, 1114–1123.

Ziemann, U., Lonnecker, S., Steinhoff, B. J., Paulus, W. (1996a). Effects of antiepileptic drugs on motor cortex excitability in humans: a transcranial magnetic stimulation study. *Ann Neurol.*, 40, 367–378.

Ziemann, U., Lonnecker, S., Steinhoff, B. J., Paulus, W. (1996b). The effect of lorazepam on the motor cortical excitability in man. *Exp Brain Res.*, 109, 127–135.

Ziemann, U., Rothwell, J. C., Ridding, M. (1996c). Interaction between intracortical inhibition and facilitation in human motor cortex. *J. Physiol.*, 496, 873–881.

## **Remerciements**

Un grand merci à Audrey Mouthon pour son aide, son soutien et sa disponibilité tout au long de l'élaboration de cette étude.

Un grand merci à Jan Ruffieux pour son aide durant la phase de test.

Un merci à toutes les personnes qui étaient les sujets de mon étude pour leur aide et leur disponibilité.

Un merci à ma famille pour son soutien sans faille.

## Déclaration personnelle

*« Je sous-signé-e 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*

## **Déclaration de cession des droits d'auteur**

*« Je sous-signé 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 du sous-signé uniquement.*

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

*Date*

*Signature*