# L’interférence rétrograde lors de l’apprentissage successif de deux tâches motrices

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

déposé par

**Joachim Tinguely**

à
l’Université de Fribourg, Suisse
Faculté des sciences et de médicine
Section Médecine
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent
Prof. Wolfgang Taube

Conseillers
Matteo Bugnon
Jan Ruffieux

Fribourg, août 2022

## Remerciements

Je tiens à remercier Dr. Matteo Bugnon pour sa présence, son aide et ses conseils tout au long de ce travail, que ce soit durant la mesure des données au laboratoire ou lors de la rédaction du travail. Je le remercie aussi pour la relecture et la correction des différentes parties du travail.

Je tiens également à remercier Jan Ruffieux pour sa disponibilité et son aide lors des mesures au laboratoire en l'absence de Matteo Bugnon.

Pour finir, un grand merci aux sujets, qui ont participé à cette expérience bien qu'elle ait pu être désagréable et de longue durée.

## Résumé

Cette étude avait pour but de déterminer si un effet d'interférence rétrograde est observé lorsque l'apprentissage d'une tâche balistique (BT) impliquant les muscles fléchisseurs du poignet est suivi de l'apprentissage d'une tâche visuomotrice (VMT) impliquant les mêmes muscles. Des études ont déjà démontré par le passé qu'une tâche de précision pouvait avoir un effet d'interférence rétrograde sur l'apprentissage initial d'une tâche balistique (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011). Dans notre étude, la tâche BT consistait à effectuer des contractions explosives isométriques maximales des muscles fléchisseurs du poignet. La tâche VMT consistait à suivre une courbe défilant sur un écran à l'aide d'un curseur dont la position était liée à la flexion/extension du poignet. Les deux tâches ont été apprises lors d'entrainements initiaux, puis à nouveau réalisées lors de tests de rétention. Le groupe *rétention immédiate* a effectué les tests de rétention immédiatement après les entrainements initiaux alors que le groupe *rétention 48 h* a effectué les tests de rétention deux jours après les entrainements initiaux, ceci afin de déterminer si l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial de la tâche BT et son test de rétention avait un effet sur l'interférence rétrograde. En parallèle, la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) a été utilisé afin d'évaluer l'évolution de l'excitabilité corticospinale du flexor carpi radialis (FCR) durant l'apprentissage de la tâche BT. Un bloc de TMS était réalisé avant (TMS 1) et après (TMS 2) l'entrainement initial de la tâche BT ainsi qu'une fois avant les tests de rétention (TMS 3). Les résultats n'ont indiqué aucune interférence rétrograde significative pour les deux groupes ($p = 0.776$) ainsi qu'aucune différence significative entre l'évolution de la performance de la tâche BT des deux groupes ($p = 0.242$). Aucune tendance n'a été observée concernant l'amplitude des MEPs et les seuils moteurs mesurés (paramètres neurophysiologiques pour l'évaluation de l'excitabilité corticospinale). L'hypothèse pour expliquer l'absence d'interférence est, d'une part, le retardement de l'exécution de la tâche d'interférence (tâche VMT) à cause du bloc TMS 2, et d'autre part, le manque de similarité au niveau du type de contractions musculaires entre la tâche VMT et la tâche BT. De plus, les effets de l'interférence rétrograde ont été peut-être uniquement visibles durant les contractions rapides effectuées au sein du bloc TMS 3 lors de la condition « pendant la tâche ». Pour compléter cette étude, il serait intéressant d'ajouter un groupe contrôle qui effectuerait uniquement la tâche BT, afin de comparer l'évolution de la performance de ce groupe avec celle des deux groupes mesurés dans cette étude. Enfin, pour de futures études, il serait préférable de se concentrer uniquement sur l'objectif principal (l'interférence rétrograde) et d'utiliser la TMS séparément sur un autre groupe apprenant uniquement la tâche BT.

## Table des matières

1 Introduction ..... 5
1.1 Processus de la mémoire motrice ..... 6
1.2 Interférence rétrograde ..... 9
1.3 Stimulation magnétique transcrânienne ..... 11
1.4 Objectifs du travail ..... 13
1.5 Questions et hypothèses ..... 14
2 Méthode ..... 16
2.1 Échantillon ..... 16
2.2 Plan de l'étude ..... 16
2.3 Tâches motrices ..... 17
2.4 Électrophysiologie ..... 19
2.5 Enregistrement et analyse des données ..... 21
3 Résultats ..... 24
3.1 Paramètres comportementaux ..... 24
3.2 Paramètres neurophysiologiques ..... 28
4 Discussion ..... 31
4.1 Paramètres comportementaux ..... 31
4.2 Paramètres neurophysiologiques ..... 34
4.3 Limites et améliorations de l'étude ..... 35
5 Conclusion ..... 37
Bibliographie ..... 39
Annexe ..... 43

# 1 Introduction

L'acquisition de nouvelles habiletés motrices (l'apprentissage moteur) est un aspect essentiel de la vie. De la naissance au plus vieil âge, l'être humain continue à apprendre des habiletés motrices nouvelles et différentes qui lui permettent de fonctionner de manière optimale dans tous les aspects de la vie (Kantak & Winstein, 2012). L'apprentissage moteur est défini comme un changement du comportement moteur résultant de la pratique (Di Rienzo et al., 2016). La pratique est ainsi le facteur le plus important pour l'acquisition d'une habileté motrice. Des améliorations de la performance sont la conséquence de l'entrainement de l'habileté motrice et permettent de quantifier l'apprentissage moteur. Cependant, le cerveau ne cesse de travailler et de traiter les informations lorsque la pratique s'arrête (Robertson et al. 2004). En effet, des changements neurobiologiques au niveau du système nerveux central qui ont été induits par l'apprentissage de l'habileté motrice sont renforcés après l'entrainement, en l'absence de pratique (Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Robertson et al., 2004). Il s'agit par exemple de changements au niveau des connexions synaptiques. Cette modulation des connexions synaptiques est décrite sous le terme de plasticité synaptique. Elle se manifeste par la potentialisation à long terme (LTP) et la dépression à long terme (LTD), deux mécanismes neurobiologiques qui semblent être nécessaires pour l'apprentissage et la mémoire (Ziemann et al., 2004). La LTP est une augmentation de l'efficacité synaptique par un renforcement de la transmission synaptique qui peut persister dans le temps. A l'inverse, la LTD est une diminution de l'efficacité de la transmission synaptique qui peut survenir lorsque les synapses sont peu utilisées (Bliss & Cooke, 2011).

Ces changements dans les réseaux fonctionnels du système nerveux central, induits par l'apprentissage, représentent la mémoire motrice (Kantak & Winstein, 2012). La mémoire motrice permet de stocker les comportements moteurs sous forme de « routines motrices ». Elle est nécessaire pour planifier, anticiper, sélectionner, adapter, apprendre, rappeler, mais aussi oublier des comportements moteurs, grâce à un processus dynamique par lequel les routines motrices anciennes (préexistantes) et nouvelles interagissent en permanence (Tallet et al., 2015). Selon Schmidt et Young (1987, cité d'après Tallet et al., 2015) les routines motrices anciennes et nouvelles peuvent s'influencer mutuellement par l'intervention de deux types de mémoire : la mémoire proactive et la mémoire rétroactive. La mémoire proactive fait référence au fait qu'une ancienne routine motrice (précédemment apprise) peut faciliter ou entraver l'acquisition d'une nouvelle routine motrice. A l'inverse, la mémoire rétroactive fait référence au fait qu'une routine motrice nouvellement acquise influence le rappel d'une routine motrice ancienne.

## 1.1 Processus de la mémoire motrice

Dans un premier temps, lors de la pratique de l'habilité motrice, une nouvelle routine motrice fragile se crée au niveau de la mémoire motrice. Ce processus est décrit comme la phase d'encodage (Kantak & Winstein, 2012). Dans un second temps, cette routine motrice fragile est stabilisée et renforcée après l'entrainement par des changements neurobiologiques qui lui permettent de persister en mémoire. Cette seconde phase, appelée consolidation, permet donc de transformer la routine motrice initialement fragile en routine motrice robuste (Robertson et al., 2004). Pour déterminer si une habileté motrice a été apprise, il est essentiel de pouvoir l'exécuter à nouveau lors d'une séance ultérieure (Kantak & Winstein, 2012). En effet, l'apprentissage est la résistance du comportement moteur (performance) qui se développe au fil de la pratique et se maintient dans le temps (Cahill et al., 2001 ; Schmidt & Bjork, 1992). Afin d'observer l'apprentissage, qui se manifeste par la rétention à long terme de l'habileté motrice, il est donc primordial de tester la performance de l'habileté après un intervalle de temps (Kantak & Winstein, 2012). Dans la recherche sur l'apprentissage moteur, il s'agit alors de tests de rétention. Ces tests de rétention permettent de voir si l'information codée et stockée avec la pratique, peut être rappelée pour une utilisation ultérieure. La formation et le maintien de la mémoire motrice procédurale dépendrait ainsi de trois processus de mémoire distincts mais interdépendants : l'encodage, la consolidation et le rappel (rétention à long terme) (Robertson, 2009 ; Robertson & Cohen., 2006 ; Robertson et al., 2004).

### *1.1.1 Encodage de la mémoire motrice*

Comme décrit ci-dessus, l'encodage est la première phase de l'apprentissage. L'encodage se passe donc durant la phase d'acquisition de l'habileté motrice pendant l'entrainement. Lors de la phase d'encodage, l'apprenant traite les informations liées à la tâche et établit des associations entre le but, le mouvement et le résultat du mouvement (Robertson, 2009). La phase d'encodage impliquerait les processus cognitifs requis pour l'identification du stimulus, la sélection de la réponse et l'exécution (Kantak & Winstein, 2012). Une fois qu'une réponse motrice est exécutée avec la force et le timing choisis, l'apprenant évalue le résultat du mouvement grâce à des mécanismes de feedback. Cette information est ensuite utilisée pour moduler les réponses futures. Tous ces mécanismes cognitivo-moteurs censés être présents pendant la pratique constituent la phase d'encodage de la mémoire motrice et permettent la création d'une mémoire motrice fragile (Kantak & Winstein, 2012).

### *1.1.2 Consolidation de la mémoire motrice*

L'apprentissage moteur n'a pas uniquement lieu pendant la pratique de l'habileté motrice, mais aussi entre les sessions d'entraînement (« off-line ») en l'absence de pratique (Karni et al., 1998 ; Robertson et al., 2004). C'est pendant cette période off-line que la consolidation de la mémoire motrice a lieu. La consolidation est l'ensemble des processus post-acquisition, par lesquels la mémoire motrice (la trace mnésique pour l'habileté motrice) devient plus stable avec le temps (Krakauer & Shadmehr, 2006 ; Robertson et al., 2004). Elle inclut par exemple la stabilisation à long terme de changements synaptiques induits par l'apprentissage initial de l'habileté motrice (Lundbye-Jensen et al., 2011). Grâce à la consolidation, une mémoire motrice initialement fragile peut donc être transformée en une mémoire motrice robuste. Ce renforcement de la mémoire motrice peut se manifester sur le plan comportemental par deux formes distinctes : le « off-line improvement » ou la stabilisation de la mémoire motrice (Robertson et al., 2004). Le off-line improvement est l'amélioration de la performance entre les sessions d'entrainement. Cela se manifeste par un niveau de performance plus élevé au début de la session suivante par rapport à celui lors de la fin de la session initiale. Ces améliorations se produisent donc sans pratique de l'habileté motrice. La stabilisation de la mémoire motrice, quant à elle, est la réduction de la fragilité d'une trace mnésique motrice après la phase d'encodage (Goedert & Willingham, 2002). En effet, la mémoire motrice fragile peut être perturbée lorsque la consolidation n'a pas encore eu lieu. C'est-à-dire qu'une nouvelle habileté motrice acquise peut être perdue si l'apprenant tente immédiatement d'acquérir une autre habileté motrice nouvelle. Cependant, si un certain temps s'écoule entre l'acquisition de la première habileté motrice et l'entrainement de la seconde, la trace mnésique de la première habileté motrice est renforcée et l'influence perturbatrice liée à la seconde habileté motrice est réduite (Goedert & Willingham, 2002). De ce fait, la consolidation est dépendante du temps. Selon différentes études, les processus de consolidation évoluent sur une période de 4 à 6 heures après l'entraînement (Brashers-Krug et al., 1996 ; Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Shadmehr & Holcomb, 1997). La consolidation (parfois partielle) de la mémoire motrice est observable par l'évolution de la performance entre les sessions d'entrainement, de sorte que le niveau de performance au début de la session suivante est plus élevé que celui au début de la session initiale. Le off-line improvement et la stabilisation de la mémoire motrice ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent être complémentaires (Robertson et al., 2004). L'importance de la consolidation dans l'apprentissage est directement soutenue par des études dont les chercheurs perturbent sélectivement les processus de consolidation par de l'interférence et évaluent l'effet subséquent de cette perturbation sur la rétention des habiletés motrices (Brashers-Krug et al., 1996 ; Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Muellbacher

et al., 2002). L'interférence de la consolidation entrave l'apprentissage moteur de l'habileté, de sorte que la trace mnésique liée à l'habileté motrice n'est pas entièrement consolidée. De ce fait, le niveau de performance acquis lors de l'apprentissage initial n'est pas maintenu dans le temps (Robertson et al., 2004). Cela confirme la nécessité de la consolidation de la mémoire motrice pour la rétention à long terme et ainsi l'apprentissage. Le phénomène d'interférence de la consolidation est expliqué plus en détail dans une prochaine partie.

### *1.1.3 Rappel de la mémoire motrice*

Le rappel de la mémoire, c'est-à-dire la rétention à long terme, est le dernier processus de la mémoire motrice (Robertson, 2009 ; Robertson & Cohen., 2006). Une fois que l'information (la trace mnésique motrice) est encodée et stockée avec la pratique, elle doit pouvoir être récupérée pour une utilisation ultérieure. L'apprentissage et la mémoire sont évalués par la capacité de l'apprenant à rappeler les informations acquises et stockées avec la pratique. Par conséquent, le rappel permet d'évaluer l'efficacité de l'encodage et de la consolidation. Ainsi, la rétention à long terme est la seule mesure possible de la mémoire et de l'apprentissage (Kantak & Winstein, 2012). Pour ce faire, comme mentionné auparavant, les chercheurs dans le domaine de l'apprentissage moteur utilisent des tests de rétention. L'objectif du test de rétention est de déterminer la permanence relative du niveau de performance atteint lors de l'acquisition de l'habileté motrice. En d'autres termes, il permet d'évaluer dans quelle mesure l'habileté motrice est retenue par l'apprenant pendant l'intervalle de rétention (intervalle entre la fin de l'acquisition de l'habileté motrice et le test de rétention). La performance du test de rétention reflète donc la force de la représentation de la mémoire motrice dans le temps. Selon Kantak et Winstein (2012), la durée de l'intervalle de rétention peut être déterminante pour la rétention à long terme. Ces chercheurs suggèrent que la performance évaluée lors d'un test de rétention différé (24 heures ou plus après la session initiale), plutôt que lors d'un test de rétention immédiat (10 s à quelques heures après la session initiale), serait une mesure plus représentative de l'apprentissage. En effet, l'évaluation de la performance immédiatement après la pratique peut ne pas être un indicateur précis de l'apprentissage de l'habileté motrice, car l'intervalle de rétention étant court, il se peut que l'efficacité des processus de consolidation qui évoluent dans les 4 à 6 heures qui suivent l'entraînement, n'y soit pas reflétée. A l'inverse, si l'intervalle de rétention est plus long (test de rétention différé), tous les processus de consolidation peuvent se produire et ainsi, la performance évaluée au test de rétention permet une inférence plus valide de la façon dont l'apprenant a encodé, consolidé et rappelé la mémoire motrice. En d'autres termes, la

performance lors du test de rétention différé reflète davantage l'efficacité des trois processus de la mémoire motrice et elle est donc un meilleur indicateur pour évaluer l'apprentissage moteur.

## 1.2 Interférence rétrograde

L'être humain a la capacité d'apprendre, conserver et répertorier des habilités motrices pendant très longtemps. Cependant il peut arriver que l'apprentissage soit entravé et que des interférences se produisent, perturbant la consolidation de la mémoire motrice et menant à la perte d'habilités nouvellement acquises (Brashers-Krug et al., 1996 ; Walker et al., 2003). Dans l'introduction ci-dessus, il a été mentionné qu'une nouvelle habileté motrice acquise peut être perdue si l'apprenant tente immédiatement d'acquérir une autre habileté motrice nouvelle. L'exposition immédiate à une seconde tâche d'apprentissage motrice peut perturber la trace mnésique de la première tâche motrice acquise (Robertson et al., 2004). Ce phénomène est appelé interférence rétrograde. De nombreuses études démontrent l'existence d'une interférence rétrograde lors de l'apprentissage consécutif de deux tâches motrices concurrentes. Elles sont construites selon le paradigme A-B-A (Sakamoto & Kondo, 2015). L'apprentissage d'une première tâche motrice A est immédiatement suivi de l'apprentissage d'une deuxième tâche motrice B (tâche d'interférence), puis la tâche motrice A est à nouveau effectuée lors d'un test de rétention qui détermine si le niveau de performance atteint lors de l'apprentissage initial de la tâche A a été maintenu dans le temps. La diminution de la performance au début du test de rétention par rapport à la fin de l'apprentissage initial implique que la consolidation de la mémoire motrice de la tâche A a été perturbée par la tâche B et qu'ainsi une interférence rétrograde s'est produite (Robertson et al., 2004).

### *1.2.1 Conditions essentielles à l'interférence rétrograde*

L'observation d'une interférence rétrograde est possible sous certaines conditions. Premièrement, les tâches motrices A et B doivent être des tâches d'apprentissage (Lundbye-Jensen et al., 2011). Cela signifie qu'elles sont nouvelles et non-automatisées : elles présupposent une amélioration de la performance grâce à l'entrainement et une consolidation.

La tâche A doit être apprise pour qu'il y ait la création d'une nouvelle trace mnésique susceptible d'être perturbée si elle n'est pas consolidée. La tâche B doit également être apprise pour qu'elle puisse interférer avec l'apprentissage de la tâche A. Dans le cas contraire, si elle est automatisée ou familière, elle est exécutée sans erreurs, c'est-à-dire qu'aucune amélioration de cette tâche n'a lieu. Cela signifie qu'il n'y a pas de création d'une nouvelle trace mnésique pour

cette tâche qui puisse interférer avec celle créée lors de l'apprentissage de la tâche A (Lundbye-Jensen et al., 2011). Deuxièmement, les tâches motrices A et B doivent être des tâches concurrentes, c'est-à-dire qu'elles doivent impliquer la même direction de mouvement et ainsi solliciter les mêmes muscles (Lundbye-Jensen et al., 2011). Dans ce cas-là, les mêmes structures du cortex moteur et voies corticospinales sont concernées. L'interférence rétrograde est donc spécifique au mouvement et ne se produit que si les circuits neuronaux moteurs engagés dans l'apprentissage de la tâche A, sont également engagés dans l'apprentissage de la tâche B (Lundbye-Jensen et al., 2011). De ce fait, les changements au niveau des connexions synaptiques induits par l'apprentissage peuvent interférer entre les deux tâches. Pour finir, l'apprentissage de la tâche d'interférence B doit se faire immédiatement après l'apprentissage initial de la tâche A, car avec le temps, la trace mnésique de la tâche A est consolidée et l'influence perturbatrice liée à la tâche B est réduite (Goedert & Willingham, 2002). Comme évoqué précédemment, la littérature scientifique a démontré qu'une pause de 4 à 6 heures entre les deux tâches d'apprentissage concurrentes empêche la deuxième tâche (B) de causer une interférence et de perturber la consolidation de la mémoire motrice de la première tâche (A) (Brashers-Krug et al., 1996 ; Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Shadmehr & Holcomb, 1997).

### *1.2.2 Différentes tâches motrices*

Dans la recherche sur l'apprentissage moteur, l'interférence rétrograde a été démontré lors de l'apprentissage de différentes tâches motrices telles que des tâches d'adaptation dynamique (adaptation à différents champs de forces externes) (Brashers-Krug et al., 1996 ; Shadmehr & Brashers-Krug, 1997), des tâches d'adaptation à des rotations visuomotrices (Krakauer, 2009 ; Wigmore et al., 2002) ou des tâches balistiques (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011). Dans les études de Lundbye-Jensen (2011) et de Lauber (2013), ainsi que leur collègues, l'apprentissage d'une tâche balistique était suivi de l'apprentissage d'une tâche de précision. La tâche balistique consistait à effectuer des contractions explosives isométriques maximales. La tâche de précision était une tâche visuomotrice qui consistait à suivre une courbe défilant sur un écran à l'aide d'un curseur dont la position était contrôlée par la force produite lors d'une contraction isométrique. Les deux tâches motrices impliquaient non seulement les mêmes muscles, mais la direction de mouvement était également la même. De plus, elles étaient toutes les deux des tâches d'apprentissage. Enfin, la tâche de précision (tâche d'interférence) était exécutée immédiatement après l'apprentissage de la tâche balistique. Ainsi les conditions essentielles à l'interférence rétrograde étaient respectées afin qu'elle puisse se produire. En effet, dans les deux études, un test de rétention immédiat a pu démontrer que la consolidation de la

tâche balistique a été perturbée par l'apprentissage de la tâche visuomotrice. Les muscles concernés étaient d'une part les muscles fléchisseurs plantaires (triceps surae) (Lundbye-Jensen et al., 2011) et d'autre part le 1er interosseux dorsal de la main responsable pour la flexion de l'index (Lauber et al., 2013). Comme l'interférence rétrograde a été observée pour ces deux groupes de muscles, en reproduisant les mêmes conditions nécessaires à l'interférence rétrograde et en reprenant le même type de tâches, nous pouvons nous attendre à observer une interférence rétrograde également pour d'autres groupes musculaires.

### 1.3 Stimulation magnétique transcrânienne

La stimulation magnétique transcrânienne (TMS) est l'outil de prédilection de nombreux scientifiques qui étudient le contrôle et l'apprentissage moteur humain (Carson et al., 2016). La TMS est une méthode de stimulation non-invasive du cerveau humain qui consiste à stimuler des neurones d'une région cérébrale ciblée (Hallett, 2007). Une bobine de stimulation placée sur le crâne crée un champ magnétique qui génère de faibles courants électriques au sein du cerveau, permettant de stimuler les neurones dans cette zone. Lorsque la bobine est placée au-dessus du cortex moteur, responsable pour l'exécution des mouvements volontaires, les neurones du tractus pyramidal sont stimulés, donnant lieu à une volée corticospinale descendante qui peut entraîner la dépolarisation des motoneurones spinaux et ainsi générer une contraction musculaire (Carson et al., 2016). La réponse électrique au niveau du muscle lors de la stimulation par TMS est appelée potentiel moteur évoqué (MEP). En déplaçant la bobine de stimulation sur le cortex moteur, il est alors possible de cibler un muscle en particulier, qui est appelé le muscle cible. La TMS est utilisée dans de nombreuses études en neurosciences afin de progresser dans la compréhension de la physiologie du cerveau. Elle permet par exemple, lors de la stimulation du cortex moteur, la quantification et l'évaluation de l'excitabilité corticospinale à l'aide des MEPs mesurés au sein du muscle cible (Bestmann & Krakauer, 2015).

#### *1.3.1 Paramètres de l'excitabilité corticospinale*

Il y a trois utilisations principales des MEPs dans les études comportementales : pour mieux comprendre l'exécution d'actions motrices, comme marqueur de changements physiologiques dans le système moteur, et comme lecture des processus en amont influençant le système moteur (Bestmann & Krakauer, 2015). C'est l'utilisation des MEPs comme marqueur de changements physiologiques dans le système moteur qui nous intéresse dans cette étude, et plus précisément l'excitabilité du tractus corticospinal. Les MEPs provoqués par TMS lors de la stimulation du cortex moteur permettent donc d'étudier l'excitabilité du tractus corticospinal. Il y a

diverses mesures TMS qui servent de paramètres pour l'excitabilité corticospinale (Hallett, 2007), comme par exemple le seuil moteur ou l'amplitude des MEPs lors de stimulations « single-pulse ». Le seuil moteur, qui est l'intensité de stimulation minimale pour observer un MEP, peut être défini au repos ainsi qu'en activité lors d'une légère contraction isométrique du muscle cible. Ce dernier, appelé seuil actif, est plus bas que le seuil au repos, car en contractant légèrement le muscle, le pool de motoneurones est à un niveau d'activité plus élevé qu'au repos ce qui facilite la production d'un MEP. L'amplitude des MEPs lors de stimulations single-pulse peut elle aussi être mesurée au repos ou en activité.

### *1.3.2 Excitabilité corticospinale durant l'apprentissage moteur*

De nombreuses études ont utilisé la TMS pour évaluer l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage d'une tâche motrice. Il a été démontré de nombreuses fois que l'excitabilité du tractus corticospinal augmente avec l'apprentissage moteur. Cette observation s'est faite par l'évaluation de paramètres de l'excitabilité corticospinale tels que ceux énoncés plus haut ainsi que d'autres mesures TMS. Christiansen et ses collègues (2018) ont par exemple observé une augmentation de l'excitabilité corticospinale pendant l'apprentissage d'une habileté visuomotrice impliquant la force de pincement du pouce et de l'index. D'autres chercheurs ont fait la même observation lors de l'apprentissage d'une tâche visuomotrice concernant les muscles fléchisseurs de l'index droit (Bagce et al., 2013) ou encore les muscles fléchisseurs du coude (Lundbye-Jensen et al., 2005). Dans les trois études, l'apprentissage de la tâche visuomotrice était associé à une augmentation de l'amplitude des MEPs mesurés au sein du muscle cible qui décrit une augmentation de l'excitabilité corticospinale. Ce changement physiologique ne se restreint pas uniquement aux tâches de précision, mais il a également été observé lors de l'apprentissage de tâches balistiques. En effet, l'excitabilité corticospinale a augmenté lors d'entrainements de flexions rapides du poignet (Ruddy et al., 2016) ou lors d'entrainements balistiques impliquant les muscles des doigts (Caroll et al. 2008 ; Lee et al. 2010 ; Lauber et al., 2013). Les changements d'excitabilité ne sont pas seulement limités aux muscles des doigts et du poignet, mais ils sont également identifiables dans d'autres groupes musculaires. Dans leur étude, Lundbye-Jensen et ses collègues (2011), ont effectivement constaté que l'acquisition d'une tâche balistique impliquant les muscles fléchisseurs plantaires était également associée à une augmentation de l'excitabilité corticospinale.

Bien que des changements de l'excitabilité corticospinale accompagnant l'apprentissage d'une habilité motrice aient été démontrés dans un certain nombre d'études, les mécanismes sous-jacents responsables de ces modifications sont encore mal compris (Christiansen et al., 2018).

Des changements dans les motoneurones spinaux, les neurones corticospinaux, les neurones sous-corticaux connectés à des fibres du tractus corticospinal et projetant vers les motoneurones spinaux, ainsi que les interneurones inhibiteurs et/ou excitateurs intracorticaux peuvent être impliqués (Lundbye-Jensen et al., 2005). Néanmoins, il a été suggéré que les changements transitoires de l'excitabilité corticospinale (survenant après une seule séance de pratique d'une habileté motrice) dépendent de la régulation négative de l'inhibition GABAérgique intracorticale, libérant ainsi les réseaux excitateurs et permettant une transmission excitatrice accrue dans le cortex moteur (Floyer-Lea et al., 2005 ; Liepert et al., 1998). Lors d'une pratique prolongée sur plusieurs jours, qui est également accompagnée d'une augmentation de l'excitabilité corticospinale, mais aussi d'une expansion de la représentation corticale des muscles correspondants, des modifications et une réorganisation structurelle ont lieu au sein du cortex moteur (Harms et al., 2008 ; Kleim et al., 2004).

## 1.4 Objectifs du travail

### *1.4.1 Objectifs principaux*

L'un des deux objectifs principaux de l'étude était de déterminer si un effet d'interférence rétrograde est observé lors de l'apprentissage successif d'une tâche balistique et d'une tâche de précision impliquant un groupe musculaire jamais étudié dans la littérature scientifique. Ce sont plus précisément les muscles fléchisseurs du poignet qui étaient concernés dans cette étude avec comme muscle cible le flexor carpi radialis (FCR). Pour avoir un effet d'interférence rétrograde, les conditions essentielles à celle-ci ont dû être respectées. Premièrement, les deux tâches motrices choisies étaient des tâches d'apprentissage. Leur amélioration de la performance par l'entrainement a été observée dans les études mentionnées auparavant (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011). Deuxièmement, le protocole de l'étude a été construit de sorte que les mêmes muscles soient impliqués dans les deux tâches motrices afin que les mêmes circuits neuronaux moteurs soient engagés. Pour finir, l'apprentissage de la tâche de précision n'a par contre pas pu se faire immédiatement après l'apprentissage initial de la tâche balistique car un bloc TMS était réalisé à la suite de l'apprentissage initial de la tâche balistique. La TMS était utile à l'atteinte de l'objectif secondaire de cette étude. La tâche de précision était alors effectuée 30-45 minutes après l'apprentissage initial de la tâche balistique. Néanmoins, cela reste toujours une fenêtre temporelle réduite par rapport aux 4 à 6 heures requises pour que la mémoire motrice de la tâche balistique soit complétement consolidée (Brashers-Krug et al., 1996 ;

Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Shadmehr & Holcomb, 1997). Ainsi, la mémoire motrice étant encore fragile, sa consolidation peut être perturbée par l'apprentissage de la tâche de précision. L'autre objectif principal de l'étude était de déterminer si l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial de la tâche balistique et son test de rétention (intervalle de rétention) avait un effet sur l'interférence rétrograde. Comme décrit plus haut dans l'introduction, la durée de l'intervalle de rétention joue un rôle dans l'observation de la consolidation d'une trace mnésique liée à une tâche. Plus cette durée est longue, plus il y a de processus nécessaires à la consolidation qui se produisent. Un intervalle de rétention long permet donc de refléter la consolidation (complète) de la mémoire motrice (et ainsi l'apprentissage) par rapport à un intervalle de rétention court. Mais qu'en est-il de l'interférence rétrograde ? Est-elle dépendante de la durée de l'intervalle de rétention ? Pour ce faire, les participants ont été partagés en deux groupes. Un groupe a effectué un test de rétention immédiat tandis que l'autre groupe a effectué un test de rétention différé, cela dans le but d'évaluer, en cas d'observation d'interférence rétrograde, s'il s'agissait uniquement d'effets à court terme ou que ceux-ci persistaient à long terme.

### *1.4.2 Objectif secondaire*

En parallèle aux objectifs principaux, cette étude avait également pour but d'évaluer l'évolution de l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage d'une tâche balistique. Pour parvenir à tel objectif, la TMS a été utilisée. Cette méthode, introduite précédemment, permet donc, la quantification et l'évaluation de l'excitabilité corticospinale à l'aide des MEPs mesurés au sein d'un muscle cible (Bestmann & Krakauer, 2015). La variabilité de certains paramètres de l'excitabilité corticospinale des muscles fléchisseurs du poignet durant l'apprentissage d'une tâche balistique a ainsi pu être évaluée grâce à la TMS et aux MEPs mesurés au sein du muscle FCR.

## 1.5 Questions et hypothèses

En considérant les différents objectifs établis, nous nous sommes posés les questions suivantes pour ce travail :

1) Est-ce que l'on observe une interférence rétrograde lors de l'apprentissage successif d'une tâche balistique et d'une tâche de précision impliquant les muscles fléchisseurs du poignet ?
2) Est-ce que l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial de la tâche balistique et son test de rétention (intervalle de rétention) est déterminant pour observer une interférence rétrograde ?

3) Est-ce que certains paramètres de l'excitabilité corticospinale des muscles fléchisseurs du poignet varient durant l'apprentissage d'une tâche balistique ?

Sur la base de la littérature scientifique présentée dans l'introduction, nous nous sommes attendus à observer, dans cette étude, une interférence rétrograde lors de l'apprentissage successif d'une tâche balistique et d'une tâche de précision impliquant les muscles fléchisseurs du poignet, ceci car les conditions essentielles à l'interférence rétrograde ont été respectées dans le protocole de l'étude. De plus, l'hypothèse que l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial de la tâche balistique et son test de rétention peut être déterminant afin d'observer une interférence rétrograde a été émise. Concernant la dernière question, nous nous sommes attendus à constater une variation de certains paramètres de l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage d'une tâche balistique. Selon la littérature scientifique mentionnée dans l'introduction, l'hypothèse a été d'observer une augmentation de l'excitabilité corticospinale associée à l'apprentissage d'une tâche balistique.

# 2 Méthode

## 2.1 Échantillon

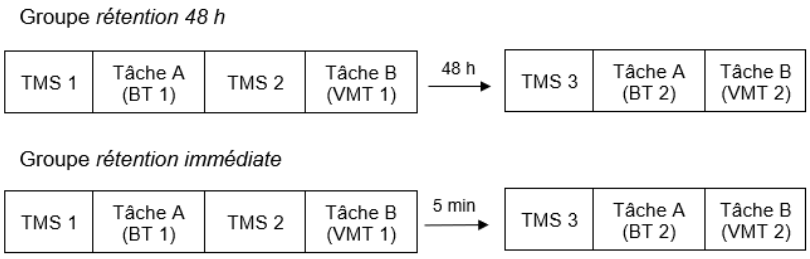
Un total de 35 sujets a été recruté pour participer à l'étude. Toutes personnes ayant entre 18 et 45 ans, en bonne santé et ne présentant aucun critère d'exclusion selon le formulaire d'informations aux volontaires (Annexe 1), était en mesure de participer à l'étude. Ce formulaire d'informations a été envoyé à chaque sujet deux jours avant la première session pour l'informer sur le déroulement de l'étude et pour s'assurer que celui-ci ne présente aucun critère d'exclusion. Une fois présent à la session de mesure, chaque sujet a dû remplir un questionnaire d'admissibilité à l'étude (Annexe 2) et signer une déclaration de consentement, avant que son âge, sa taille et son poids ne soient relevés. Les sujets ont été départagés en deux groupes de 17 personnes chacun : groupe *rétention 48 h* (10 hommes, 7 femmes, âge : 22 ± 3 ans, taille : 176 ± 9 cm, poids : 70 ± 13 kg (moyenne ± écart-type)) et groupe *rétention immédiate* (10 hommes, 7 femmes, âge : 24 ± 2 ans, taille : 173 ± 10 cm, poids : 70 ± 11 kg). Les sujets du groupe *rétention 48 h* ont pris part à deux sessions de mesures : une première session d'environ 2 heures, et après 48 heures, une deuxième session d'environ 1 heure. Les sujets du groupe *rétention immédiate* ont pris part à une seule session qui a duré environ 3 heures et demie. Les sessions de mesures ont eu lieu au laboratoire dédié à cette étude dans le bâtiment de physique de l'Université de Fribourg (chemin du musée 3, 1700 Fribourg).

## 2.2 Plan de l'étude

L'étude, qui comprenait une tâche d'apprentissage A et une tâche d'interférence B, était construite selon le paradigme classique A-B-A-B. Les deux tâches ont été apprises et exercées lors d'entrainements initiaux, puis à nouveau réalisées lors de tests de rétention.

**Figure 1**

*Protocole de l'étude*



*Note.* Représentation visuelle des étapes du protocole. Les deux groupes (*rétention 48 h* et *rétention immédiate*) ont effectué des entrainements initiaux et des tests de rétention des tâches motrices A (tâche balistique (BT)) et B (tâche visuomotrice (VMT)). Plusieurs blocs de stimulation magnétique transcrânienne (TMS 1, 2 et 3) ont été effectués entre les différentes étapes.

La tâche d'apprentissage A était une tâche balistique (BT). La tâche d'interférence B quant à elle, était une tâche visuomotrice de précision (VMT). En plus des entrainements des tâches BT et VMT, un bloc de TMS était réalisé avant (TMS 1) et après (TMS 2) l'entrainement initial de la tâche BT ainsi qu'une fois avant les tests de rétention (TMS 3). L'unique différence entre les deux groupes était l'intervalle de temps entre les entrainements initiaux des tâches et le moment des tests de rétention. Les sujets du groupe *rétention 48 h*, ont effectué les tests de rétention 48 heures après les entrainements initiaux des tâches BT et VMT tandis que les sujets du groupe *rétention immédiate* ont effectué les tests de rétention immédiatement après les entrainements initiaux (Figure 1), tout en prenant compte du décalage de 30-45 minutes à cause du bloc TMS 3 qui était effectué avant.

### 2.3 Tâches motrices

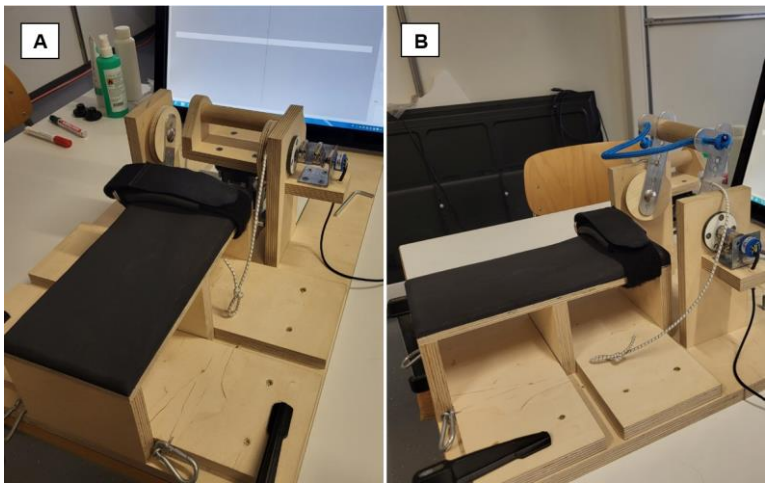
Comme mentionné précédemment, le protocole comprenait une tâche d'apprentissage BT suivie d'une tâche d'interférence VMT. Les deux tâches motrices ont été exécutées avec la main non-dominante du sujet afin qu'elles ne soient pas habituelles et qu'un apprentissage ait lieu. Les deux tâches motrices ont été réalisées sur l'engin qui est présenté sur la Figure 2. La poignée de l'engin (Figure 2, B) était réglée de sorte que l'axe de rotation physiologique du poignet du sujet soit aligné à l'axe de rotation de la poignée. La position a été notée afin de remettre la poignée dans la même position lors du deuxième jour de mesure (pour le groupe *rétention 48 h*).

Durant l'exécution des deux tâches motrices une pause de 15 secondes était octroyée aux sujets entre les essais. Après un certain nombre d'essais ou à la demande du sujet, une pause d'environ 1 minute était effectuée afin de reprendre ses forces et/ ou sa concentration. La tâche BT contenait 35 essais à l'entrainement initial et de même au test de rétention. La tâche VMT comprenait 50 essais à l'entrainement initial et 15 essais au test de rétention. Comme l'objectif de cette étude était d'observer l'interférence rétrograde de l'apprentissage de la tâche VMT sur la consolidation de la tâche BT, le test de rétention de la tâche VMT avait peu d'importance, d'où le nombre d'essais réduit. Pour les deux tâches motrices, le but des sujets était d'améliorer leur apprentissage en essayant d'atteindre la meilleure performance à chaque essai. Pour les aider à

cela, ils ont été encouragés lors de l'exécution des tâches motrices. En plus des encouragements, les sujets recevaient un feedback sous forme de courbe qui représentait l'évolution de leur performance pendant l'entrainement.

**Figure 2**

*Engin utilisé pour les tâches motrices*




*Note*. (A) La tâche balistique était effectuée à l'aide d'une poignée en bois qui était reliée à une plaque de force permettant de mesurer la force verticale en Newton. La lanière noire permettait d'immobiliser l'avant-bras durant les contractions explosives isométriques maximales. (B) La tâche visuomotrice était effectuée à l'aide d'une poignée en bois mobile qui était retenue par des élastiques afin de créer une résistance.

### *2.3.1 Tâche balistique*

Lors de la tâche BT, le sujet prenait en main la poignée en bois (Figure 2, A) et effectuait des contractions explosives isométriques maximales des muscles fléchisseurs du poignet. En d'autres termes, son but était de faire une flexion du poignet en produisant la force la plus élevée le plus rapidement possible. Après chaque essai, le sujet recevait un feedback de sa performance sous forme de score affiché sur un écran. Le score, en N/s, représentait le taux de développement de la force (RFD) maximal. Le RFD est défini comme la pente de la courbe de force générée lors de la contraction explosive isométrique maximale et mesurée à l'aide d'une plaque de force (MC3A-500 ; Advanced Mechanical Technology Inc., MA, USA). Lors de l'entrainement de la tâche BT, le sujet pouvait entendre 3 bips sonores courts, signifiant qu'il devait se préparer, suivi d'un 4$^{ème}$ bip plus long après lequel il lui était demandé d'effectuer sa contraction. Le RFD était ensuite calculé de façon répétée sur la courbe de force afin de trouver la

fenêtre de 20 ms avec le RFD le plus élevé. Le but du sujet était d'atteindre le score (c'est-à-dire le RFD) le plus élevé possible à chaque essai et d'améliorer ainsi sa performance pendant l'entrainement.

### *2.3.2 Tâche visuomotrice*

La tâche VMT consistait à suivre une courbe défilant sur un écran avec un curseur. Il s'agissait de la même courbe pour tous les essais. Le sujet tenait la poignée en bois (Figure 2, B) qu'il pouvait manipuler afin de contrôler la position du curseur à l'écran grâce à un potentiomètre placé dans l'axe de rotation de l'engin. Plus précisément, lorsque le sujet faisait une flexion du poignet, le curseur se déplaçait vers le haut et lors de l'extension du poignet vers le bas. Une résistance élastique a été appliquée afin de limiter l'activité musculaire aux fléchisseurs du poignet, soit au groupe musculaire contenant le FCR. Comme durant la tâche précédente, le score s'affichait à l'écran après chaque essai. Cette fois-ci, contrairement à la tâche BT, l'objectif était d'atteindre le score le plus petit, comme il s'agissait de l'erreur commise lors du suivi de la courbe avec le curseur. L'erreur, qui est d'unité arbitraire, a été calculée comme la distance verticale entre le tracé du curseur et la ligne centrale de la courbe à suivre. Ainsi, le but du sujet était de réduire son score (c'est-à-dire son erreur) au cours de l'entrainement.

## 2.4 Électrophysiologie

### *2.4.1 Electromyographie de surface*

La première étape de la session de mesure était l'installation de l'électromyographie (EMG) de surface qui est une technique non-invasive permettant de mesurer l'activité électrique d'un muscle cible. Comme précisé dans l'introduction, le muscle cible pour cette étude se trouvait au niveau de l'avant-bras : il s'agissait du FCR qui est responsable pour la flexion du poignet. Deux capteurs EMG (Trigno Quattro Sensor ; Delsys Inc., MA, USA) ont été placés sur l'avant-bras des sujets : un capteur sur le FCR et l'autre sur un muscle extenseur du poignet (pour contrôle). Avant de coller les capteurs, il était nécessaire de préparer la peau du sujet, afin d'avoir un signal de bonne qualité. Pour ce faire, les zones de poses ont été rasées et puis nettoyées avec un gel abrasif suivi d'alcool. Une fois les régions de peau préparées, les capteurs ont pu être placés. Après l'installation, il était nécessaire de contrôler la qualité du signal EMG ainsi que la position des électrodes. Pour cela, il a été demandé au sujet d'effectuer une flexion (respectivement une extension) du poignet, tout en contrôlant visuellement le signal EMG qui s'affichait sur l'écran d'un ordinateur. Si la qualité du signal EMG était correcte, l'installation

était terminée. Pour le groupe *rétention 48 h*, les zones de poses ont été marqués avec un feutre indélébile afin que les électrodes soient placées au même endroit lors de la deuxième session de mesure. L'activité électrique des muscles fléchisseurs et extenseurs du poignet a été enregistrée uniquement pendant les blocs de TMS et pour la neurostimulation transcutanée électrique. Chaque signal EMG (de bande passante 20-450 Hz) a été enregistré à une fréquence de 4000 Hz.

### *2.4.2 Neurostimulation transcutanée électrique*

Après avoir installé les capteurs EMG sur l'avant-bras du sujet, la deuxième étape était de stimuler le nerf médian par neurostimulation transcutanée électrique (Digitimer DS7Q ; Digitimer Ltd, Hertfordshire, UK) qui est une méthode de stimulation nerveuse non-invasive. Le nerf médian, qui contient les fibres innervant le FCR, trouve son origine dans la région axillaire, descend le long du bras et se termine au niveau de la main. Une fois le gel conducteur appliqué, la cathode et l'anode de l'électrode de stimulation ont été placées du côté médial du bras, sous le biceps au niveau de l'articulation du coude. À cet endroit, le nerf médian a été stimulé par des courants électriques circulant de la cathode à l'anode, pour provoquer la contraction du FCR et une flexion du poignet. Grâce aux capteurs EMG, les réponses électriques du FCR, appelées M-Waves, ont été enregistrées. Lors des stimulations, l'amplitude « peak-to-peak » des M-Waves résultantes a été mesurée. C'est la différence en millivolt entre la tension la plus haute et la plus basse de la M-Wave. L'intensité de stimulation a été augmentée petit à petit jusqu'à atteindre l'intensité à laquelle l'amplitude de la M-Wave n'augmentait plus. Cette amplitude maximale de la M-Wave mesurée est définie comme la M-Max, et représente la réponse électrique maximale du FCR. L'amplitude de la M-Max a servi à la normalisation de la taille des MEPs provoqués par la TMS dans la suite de la session de mesure. La normalisation a permis de comparer les MEPs des sujets ayant effectué deux sessions de mesure à 48 h d'intervalle.

### *2.4.3 Stimulation magnétique transcrânienne*

Comme énoncé plus tôt, la TMS a été effectuée durant trois blocs : TMS 1, TMS 2 et TMS 3. Des stimulations délivrées par une bobine en forme de huit reliée à un stimulateur (MagPro with MagOption ; MagVenture A/S, Farum, Denmark) ont été appliquées sur la région du cortex moteur primaire responsable pour les muscles de l'avant-bras. Une fois ces neurones stimulés par TMS, une légère contraction musculaire du FCR pouvait être observée, provoquant une légère flexion du poignet. À nouveau à l'aide des capteurs EMG, les réponses électriques du

FCR, appelées MEPs, ont été enregistrées et observées sur un ordinateur. Comme la commande motrice depuis le cerveau se fait de façon controlatérale, la bobine a été placée sur l'hémisphère cérébral opposé à l'avant-bras dont l'activité était mesurée. À l'aide d'un système de neuronavigation (composé d'une caméra détectant des marqueurs collés sur la bobine de stimulation et sur un bandeau placé sur le front du sujet) et de l'enregistrement de la position de points anatomiques situés sur la tête du sujet, la position de la bobine a pu être suivie et ajustée en temps réel (Polaris Spectra, Northern Digital Inc., Waterloo, Canada et Localite TMS Navigator Version 2.0.5, LOCALITE GmbH, Sankt Augustin, Germany). Cela a permis de stimuler la même zone sur le crâne du sujet tout au long des blocs TMS.

Une fois le sujet installé et avant de commencer les stimulations du premier bloc TMS, il était nécessaire de trouver le « hot-spot » et d'enregistrer sa position dans le système de neuro-navigation. L'enregistrement de la position a permis de stimuler la même région du cerveau pendant les différents blocs TMS. Le hot-spot est la zone du crâne où lorsqu'elle est stimulée, les meilleures réponses (c'est-à-dire les MEPs les plus grands) au niveau du muscle cible (le FCR dans notre cas) sont identifiées. Chaque bloc TMS comprenait les étapes suivantes. Tout d'abord, il fallait définir les seuils moteurs au repos (RMT) et actif (AMT). Le RMT était défini comme l'intensité de stimulation minimale (en % du stimulateur) requise pour produire des MEPs d'amplitude supérieure à 0,5 mV dans 5 essais sur 10. Le AMT était défini de la même manière mais les MEPs devaient être d'amplitude supérieure à 1 mV. Le RMT était mesuré lorsque le muscle était relâché tandis que le AMT était mesuré lors d'une contraction isométrique. Pour ce dernier, le sujet effectuait sur l'engin (Figure 2, B) une contraction isométrique du FCR de faible intensité avec le poignet en position de légère flexion par rapport à la position neutre. Ensuite, une fois les seuils moteurs définis, chaque sujet a reçu 20 stimulations single-pulse pendant qu'il effectuait une contraction isométrique du FCR correspondant à 20-30% de sa force maximale (même position que pour la détermination du AMT). Pour ce faire, un poids (4 kg pour les hommes et 3 kg pour les femmes) a été suspendu à la lanière bleue (Figure 2, B). L'intensité des stimulations single-pulse était fixée à 130% du AMT. Cette série de stimulations single-pulse et l'amplitude des MEPs résultants ainsi que les seuils moteurs des sujets ont permis par la suite d'évaluer l'excitabilité corticospinale du FCR pendant l'apprentissage de la tâche BT.

### 2.5 Enregistrement et analyse des données

Toutes les données ont été enregistrées à l'aide d'un programme spécialement conçu pour cette étude et écrite en langage *Python*.

Tous les tests statistiques ont été effectués à l'aide du programme statistique Jamovi (Version 2.2.5). Le seuil de significativité a été établi avant l'analyse des données à $p < 0.05$ pour tous les tests statistiques concernant les paramètres comportementaux et les paramètres neurophysiologiques.

### *2.5.1 Paramètres comportementaux*

En premier, il a fallu démontrer que les deux tâches motrices étaient des tâches d'apprentissage, afin que la première condition pour qu'une interférence rétrograde se produise soit respectée. Il a donc fallu démontrer une amélioration de la performance durant l'entrainement pour les deux tâches motrices. A cet effet, la performance en début d'entrainement a été comparée à la performance en fin d'entrainement, cela pour l'entrainement initial (BT 1 resp. VMT 1) ainsi que le test de rétention (BT 2 resp. VMT 2). Les scores des tâches motrices ont été subdivisés par blocs de 5 essais. La performance en début respectivement en fin d'entrainement était définie par la moyenne des 5 premiers essais (premier bloc) respectivement des 5 derniers essais (dernier bloc) des entrainements pour chaque sujet. La moyenne est plus représentative qu'un seul essai, qui pouvait être influencé par la concentration ou la fatigue. Les valeurs extrêmes (synonymes de manque de concentration ou de faute flagrante pour la tâche VMT et de faute de timing ou de fatigue extrême pour la tâche BT) n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la moyenne des 5 essais. Dans le cas d'une valeur extrême, l'essai précédent respectivement suivant a été intégré dans le calcul de la moyenne. Pour comparer la performance en début d'entrainement à la performance en fin d'entrainement un t-test d'échantillons appariés a été effectué. La distribution normale des données a été contrôlée (test de Shapiro-Wilk) pour pouvoir effectuer un t-test de Student. Lorsque celle-ci n'était pas respectée, un t-test non-paramétrique (le t-test de Wilcoxon) a été utilisé. Les tests statistiques ont été réalisés séparément pour les deux tâches ainsi que pour les deux groupes (*rétention immédiate* et *rétention 48 h*). Pour répondre à la question principale de l'étude, à savoir si l'apprentissage de la tâche BT (et plus précisément sa consolidation) pouvait être perturbé par l'apprentissage de la tâche VMT (effet d'interférence rétrograde), il a fallu comparer l'évolution de la performance entre la fin de l'entrainement initial (BT 1) et le début du test de rétention (BT 2) des deux groupes. A nouveau la performance était définie par la moyenne du dernier bloc respectivement du premier bloc pour chaque sujet. Pour cette analyse, une ANOVA à mesures répétées à design mixte a été réalisée afin de comparer les deux groupes. L'ANOVA comprenait les facteurs *Groupe* (*rétention immédiate* ou *rétention 48 h*), *Bloc de mesure* (dernier bloc de BT 1 ou premier bloc de BT 2) et l'interaction entre ces deux facteurs (*Bloc de mesure* x *Groupe*). Cette analyse a permis de voir

si une différence de performance a été observée entre la fin de BT 1 et le début de BT 2, et si celle-ci était dépendante du groupe, c'est-à-dire si la durée de l'intervalle de rétention jouait un rôle déterminant pour observer de l'interférence rétrograde.

### *2.5.2 Paramètres neurophysiologiques*

Les paramètres neurophysiologiques qui ont été mesurés sont les seuils moteurs (RMT et AMT) ainsi que l'amplitude des MEPs lors de stimulation single-pulse à 130% du AMT en activité. L'amplitude peak-to-peak de chaque MEP individuel a été calculée sur le signal EMG brut (mV). La moyenne, calculée à partir des amplitudes obtenues à la suite des 20 stimulations, a également été exprimée en pourcentage de la M-Max pour ensuite être utilisée pour l'analyse. Afin d'évaluer l'excitabilité corticospinale des muscles fléchisseurs du poignet durant l'apprentissage de la tâche BT, différentes analyses ont été effectuées. L'excitabilité corticospinale a été évaluée pour l'apprentissage initial (TMS 1 et TMS 2) ainsi que pour l'apprentissage en entier (TMS 1, TMS 2 et TMS 3).

Pour évaluer les changements d'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage initial de la tâche BT, c'est l'amplitude brute des MEPs qui a été utilisée. Une ANOVA à mesures répétées à design mixte a été effectuée afin de comparer l'amplitude brute des MEPs entre les deux groupes durant les blocs TMS 1 et TMS 2. L'ANOVA comprenait les facteurs *Groupe* (*rétention immédiate* ou *rétention 48 h*), *Bloc de mesure* (TMS 1 ou TMS 2) et l'interaction entre ces deux facteurs (*Bloc de mesure* x *Groupe*).

Enfin, pour évaluer l'évolution de l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage en entier de la tâche BT, différents tests statistiques ont été réalisés. Une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour chaque groupe afin de comparer les RMTs durant les trois blocs TMS ainsi que les AMTs. Une ANOVA à mesures répétées à design mixte a également été réalisée afin de comparer l'amplitude des MEPs (exprimée en % de la M-Max) entre les trois blocs TMS et les deux groupes. L'ANOVA comprenait les facteurs *Groupe* (*rétention immédiate* ou *rétention 48 h*), *Bloc de mesure* (TMS 1, TMS 2 ou TMS 3) et l'interaction entre ces deux facteurs (*Bloc de mesure* x *Groupe*). Pour les différentes ANOVA, la sphéricité a été contrôlée (test de Mauchly) et si elle n'était pas respectée, la correction de Huynh-Feldt a été appliquée. Dans le cas où une différence significative était détectée concernant l'un de ces facteurs, des tests post hoc avec la correction de Bonferroni étaient effectués afin de comparer les résultats des différents blocs par paires.

# 3 Résultats

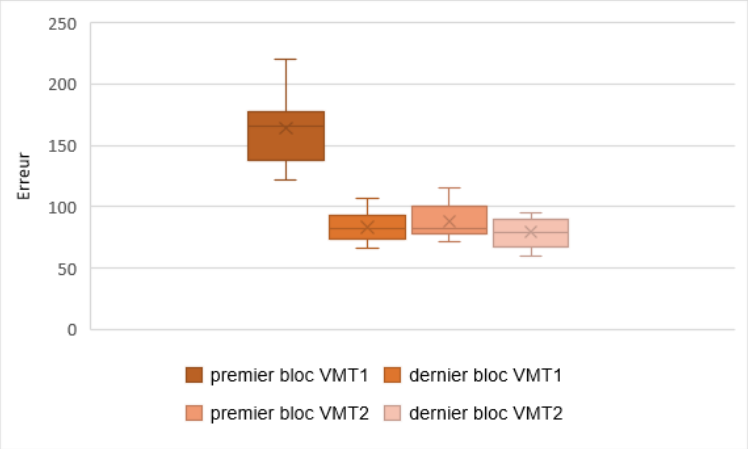
## 3.1 Paramètres comportementaux

### *3.1.1 Évolution de la performance lors de la tâche visuomotrice*

Les performances des deux groupes en début et en fin d'entrainement pour l'apprentissage initial (VMT 1) ainsi que pour le test de rétention (VMT 2) de la tâche VMT (tâche d'interférence) sont illustrées sur la Figure 3 et la Figure 4. Pour le groupe *rétention immédiate*, une différence significative a été observée entre la performance en début et en fin d'entrainement, et cela pour les deux entrainements (VMT 1 (test de Student) : $t_{(16)} = 14.1$, $p < 0.001$ ; VMT 2 (test de Wilcoxon) : $W = 131$, $p = 0.008$). La performance en fin d'entrainement (dernier bloc VMT 1 = 83.5 ; dernier bloc VMT 2 = 79.7) était en moyenne meilleure que celle en début d'entrainement (premier bloc VMT 1 = 163.9 ; premier bloc VMT 2 = 88.1). Les sujets ont diminué en moyenne leur erreur de 49.1 % pour VMT 1 et de 9.5 % pour VMT 2.

**Figure 3**

*Évolution de la performance du groupe rétention immédiate pendant les entrainements de la tâche visuomotrice*



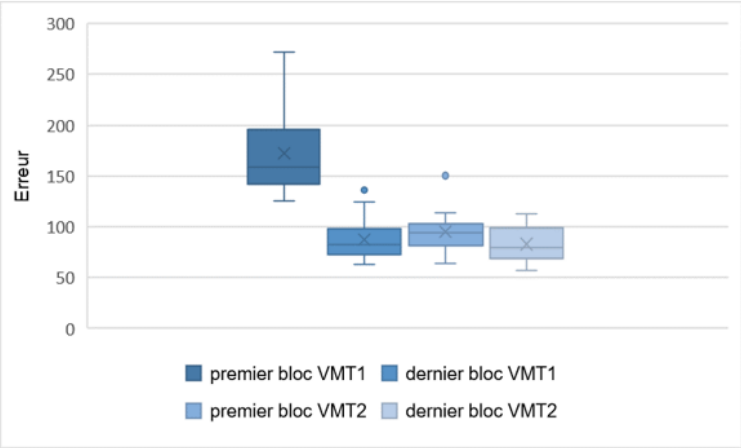

*Note*. Les performances pour les blocs de début (premier bloc) et de fin d'entrainement (dernier bloc) sont illustrées pour l'apprentissage initial (VMT 1) et le test de rétention (VMT 2) de la tâche visuomotrice (VMT) du groupe *rétention immédiate*. Les données représentent la moyenne des 5 essais par bloc pour chaque sujet. Les boîtes à moustaches montrent la répartition des résultats des sujets pour chaque bloc (la croix représentant la moyenne du bloc). Les

scores représentent l'erreur commise. Groupe *rétention immédiate* : a effectué VMT 2 une heure après VMT 1.

Pour le groupe *rétention 48 h* les mêmes observation ont été faites. Une différence significative a été observée entre la performance en début et en fin des entrainements (VMT 1 (test de Wilcoxon) : $W = 153$, $p < 0.001$ ; VMT 2 (test de Wilcoxon) : $W = 142$, $p = 0.002$). La performance en fin d'entrainement (dernier bloc VMT 1 = 87.4 ; dernier bloc VMT 2 = 83) était en moyenne meilleure que celle en début d'entrainement (premier bloc VMT 1 = 172.2 ; premier bloc VMT 2 = 94.9). Les sujets ont diminué en moyenne leur erreur de 49.2 % pour VMT 1 et de 12.5 % pour VMT 2.

**Figure 4**

*Évolution de la performance du groupe rétention 48 h pendant les entrainements de la tâche visuomotrice*




*Note*. Les performances pour les blocs de début (premier bloc) et de fin d'entrainement (dernier bloc) sont illustrées pour l'apprentissage initial (VMT 1) et le test de rétention (VMT 2) de la tâche visuomotrice (VMT) du groupe *rétention 48 h*. Les données représentent la moyenne des 5 essais par bloc pour chaque sujet. Les boîtes à moustaches montrent la répartition des résultats des sujets pour chaque bloc (la croix représentant la moyenne du bloc). Les scores représentent l'erreur commise. Groupe *rétention 48 h* : a effectué VMT 2 deux jours après VMT 1.

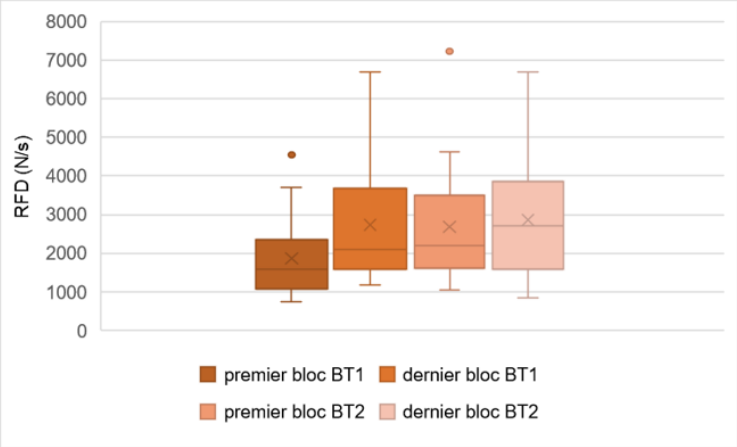
### *3.1.2 Évolution de la performance lors de la tâche balistique*

Les performances des deux groupes en début et en fin d'entrainement pour l'apprentissage initial (BT 1) ainsi que pour le test de rétention (BT 2) de la tâche BT (tâche d'apprentissage) sont

illustrées sur la Figure 5 et la Figure 6. Pour le groupe *rétention immédiate*, une différence significative a été observée entre la performance en début et en fin d'entrainement, mais uniquement pour l'entrainement initial (BT 1 (test de Wilcoxon) : $W = 0$, $p < 0.001$ ; BT 2 (test de Wilcoxon) : $W = 51$, $p = 0.243$). La performance en fin d'entrainement (dernier bloc BT 1 = 2734.3 N/s ; dernier bloc BT 2 = 2861.6 N/s) était en moyenne plus élevée que celle en début d'entrainement (premier bloc BT 1 = 1870.4 N/s ; premier bloc BT 2 = 2684.9 N/s). Les sujets ont amélioré leur performance en moyenne de 46.2 % pour BT 1 et de 6.6 % pour BT 2 (Figure 5).

**Figure 5**

*Évolution de la performance du groupe rétention immédiate pendant les entrainements de la tâche balistique*



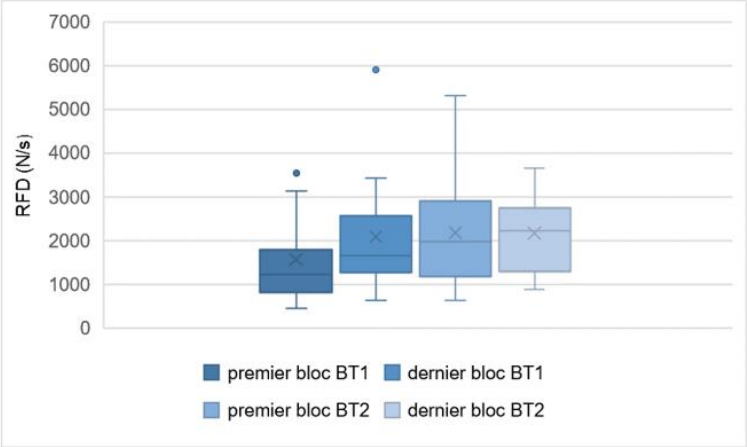

*Note*. Les résultats pour les blocs de début (premier bloc) et de fin d'entrainement (dernier bloc) sont illustrés pour l'apprentissage initial (BT 1) et le test de rétention (BT 2) de la tâche balistique (BT) du groupe *rétention immédiate*. Les données représentent la moyenne des 5 essais par bloc pour chaque sujet. Les boîtes à moustaches montrent la répartition des résultats des sujets pour chaque bloc (la croix représentant la moyenne du bloc). Les scores représentent le taux de développement de la force (RFD). Groupe *rétention immédiate* : a effectué BT 2 une heure et demie après BT 1.

Pour le groupe *rétention 48 h* les mêmes observations ont été faites. Une différence significative a été observée uniquement entre la performance au début et à la fin de l'entrainement initial (BT 1 (test de Wilcoxon) : $W = 8$, $p < 0.001$ ; BT 2 (test de Student) : $t_{(16)} = 0.029$, $p = 0.977$). Pour BT 1 la performance en fin d'entrainement (2089.1 N/s) était en moyenne plus élevée que

celle en début d'entrainement (1564.1 N/s). Les sujets ont amélioré leur performance en moyenne de 33.6 %. A l'inverse, pour BT 2 la performance en fin d'entrainement (2168.4 N/s) était en moyenne légèrement plus faible que celle en début d'entrainement (2172.9 N/s ; légère baisse de 0.2%) (Figure 6).

**Figure 6**

*Évolution de la performance du groupe rétention 48 h pendant les entrainements de la tâche balistique*



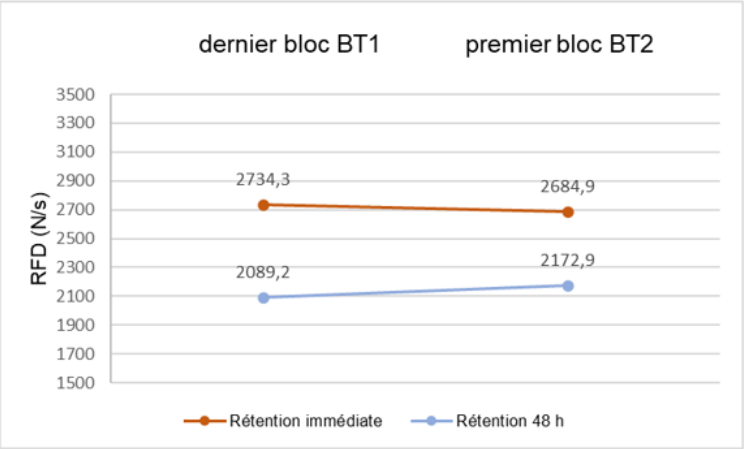

*Note*. Les résultats pour les blocs de début (premier bloc) et de fin d'entrainement (dernier bloc) sont illustrés pour l'apprentissage initial (BT 1) et le test de rétention (BT 2) de la tâche balistique (BT) du groupe *rétention 48 h*. Les données représentent la moyenne des 5 essais par bloc pour chaque sujet. Les boîtes à moustaches montrent la répartition des résultats des sujets pour chaque bloc (la croix représentant la moyenne du bloc). Les scores représentent le taux de développement de la force (RFD). Groupe *rétention 48 h* : a effectué BT 2 deux jours après BT 1.

Pour finir, la performance en fin d'apprentissage initial (dernier bloc BT 1) a été comparé à la performance en début de test de rétention (premier bloc BT 2), et ce pour les deux groupes. L'ANOVA à design mixte n'a indiqué aucun effet significatif pour les facteurs *Bloc de mesure* ($F_{(1, 32)} = 0.083$, $p = 0.776$) et *Groupe* ($F_{(1, 32)} = 1.42$, $p = 0.242$), ainsi que pour l'interaction *Bloc de mesure* x *Groupe* ($F_{(1, 32)} = 1.237$, $p = 0.274$). Malgré le fait que l'interaction ne soit pas significative, une (légère) tendance a été observée (Figure 7) : pour le groupe *rétention 48 h* une amélioration de 4 % de la performance moyenne a été observée entre la fin de

l'apprentissage initial et le début du test de rétention tandis que le groupe *rétention immédiate* a montré une régression de 1.8 %.

**Figure 7**

*Évolution de la performance entre l'entrainement initial et le test de rétention de la tâche balistique*




*Note.* La performance moyenne en fin d'apprentissage initial de la tâche balistique (dernier bloc BT 1) ainsi que la performance moyenne en début de test de rétention (premier bloc BT 2) sont illustrées pour les deux groupes. Les scores représentent le taux de développement de la force (RFD). Groupes : *rétention immédiate* (a effectué BT 2 une heure et demie après BT 1) et *rétention 48 h* (a effectué BT 2 deux jours après BT 1).

## 3.2 Paramètres neurophysiologiques

### *3.2.1 Seuils moteurs*

Les résultats des deux seuils moteurs mesurés durant les trois blocs TMS sont présentés dans le Tableau 1. Pour le groupe *rétention immédiate*, l'ANOVA à mesures répétées n'a montré aucune différence significative entre les différents RMTs ($F_{(1.33, 18.63)} = 0.858$, *p-ajusté* = 0.397). Cependant une différence significative a été observée entre les différents AMTs ($F_{(2, 28)} = 5.73$, $p = 0.008$). Les résultats des tests post hoc ont indiqué une différence significative entre les AMTs mesurés durant les blocs TMS 1 et TMS 3 ($p_{bonferroni} = 0.023$) ainsi qu'entre les blocs TMS 2 et TMS 3 ($p_{bonferroni} = 0.031$). Les AMTs mesurés durant les blocs TMS 1 et 2 étaient en moyenne plus bas que durant le bloc TMS 3 (Tableau 1). Pour le groupe *rétention 48 h*,

l'ANOVA à mesures répétées n'a montré aucune différence significative entre les différents RMTs ($F_{(1.26, 17.67)} = 1.98$, *p-ajusté* = 0.175) et AMTs ($F_{(1.37, 19.22)} = 2.6$, *p-ajusté* = 0.115).

**Tableau 1**

*Représentation des seuils moteurs durant les trois blocs TMS*

| | TMS 1 | TMS 2 | TMS 3 |
|---|---|---|---|
| Groupe *rétention immédiate* | | | |
| RMT (%) | 43.1 ± 6.4 | 42.1 ± 5.6 | 42.4 ± 4.9 |
| AMT (%) | 33.7 ± 4.1 | 33.7 ± 4 | 34.7 ± 3.7 |
| Groupe *rétention 48 h* | | | |
| RMT (%) | 49 ± 11.2 | 47.3 ± 9.2 | 51.7 ± 15.2 |
| AMT (%) | 37.6 ± 6.7 | 36.6 ± 6.6 | 38.2 ± 6.1 |

*Note.* Le seuil moteur au repos (RMT) et actif (AMT) des sujets est affiché en tant que moyenne ± écart-type pour les différents blocs de stimulation magnétique transcrânienne (TMS). Chaque valeur représente le pourcentage d'intensité du stimulateur auquel le seuil a été mesuré (%).

### *3.2.2 Amplitude des MEPs durant une contraction isométrique*

Les résultats pour les amplitudes des MEPs (en mV et exprimées en % de la M-Max) durant les trois blocs TMS et pour les deux groupes sont présentés dans le Tableau 2. Concernant l'amplitude des MEPs exprimée en % de la M-Max, l'ANOVA à design mixte n'a indiqué aucun effet significatif pour les facteurs *Bloc de mesure* ($F_{(1.31, 36.6)} = 2.94$, *p-ajusté* = 0.085), et *Groupe* ($F_{(1, 28)} = 0.154$, $p = 0.698$), ainsi que pour l'interaction *Bloc de mesure* x *Groupe* ($F_{(1.31, 36.6)} = 2.04$, *p-ajusté* = 0.157). Pour le groupe *rétention 48 h*, l'amplitude des MEPs était en moyenne plus petite lors du bloc TMS 3 par rapport aux blocs TMS 2 et TMS 1 (Tableau 2), ce qui explique la tendance observée vers un effet du facteur *Bloc de mesure*.

Concernant l'évolution de l'amplitude brute (en mV) des MEPs durant l'apprentissage initial de la tâche BT, l'ANOVA à design mixte n'a indiqué aucun effet significatif pour les facteurs *Bloc de mesure* ($F_{(1, 28)} = 0.073$, $p = 0.79$) et *Groupe* ($F_{(1, 28)} = 0.969$, $p = 0.333$), ainsi que pour l'interaction *Bloc de mesure* x *Groupe* ($F_{(1, 28)} = 1.731$, $p = 0.199$).

**Tableau 2**

*Représentation de l'amplitude des MEPs issus de stimulations single-pulse délivrées durant une contraction isométrique*

| | TMS 1 | TMS 2 | TMS 3 |
|---|---|---|---|
| Groupe *rétention immédiate* | | | |
| MEP brut (mV) | 2.31 ± 1.27 | 2.15 ± 0.93 | |
| MEP (%) | 41.7 ± 26.5 | 39.9 ± 24.4 | 39.9 ± 20.3 |
| Groupe *rétention 48 h* | | | |
| MEP brut (mV) | 1.82 ± 0.9 | 1.92 ± 0.99 | |
| MEP (%) | 40.5 ± 25 | 40.8 ± 23.9 | 31 ± 14.5 |

*Note*. L'amplitude des MEPs est affichée de manière brute (mV) et en pourcentage de la M-Max (%). C'est la moyenne ± écart-type des sujets pour les différents blocs de stimulation magnétique transcrânienne (TMS) qui est donnée.

# 4 Discussion

## 4.1 Paramètres comportementaux

L'un de deux objectifs principaux de cette étude était de déterminer si un effet d'interférence rétrograde est observé lorsque l'apprentissage d'une tâche BT impliquant les muscles fléchisseurs du poignet est suivi de l'apprentissage d'une tâche VMT impliquant les mêmes muscles. Pour ce faire, l'évolution de la performance a été comparée entre la fin de l'apprentissage initial (dernier bloc BT 1) et le début du test de rétention (premier bloc BT 2) pour les deux groupes. Le groupe *rétention immédiate* a démontré une légère régression de la performance moyenne de 1.8 % entre ces deux blocs. Cela pourrait signifier que l'apprentissage de la tâche VMT a (légèrement) perturbé la consolidation de la tâche BT, ce qui indiquerait une interférence rétrograde. Néanmoins, la différence entre les deux blocs n'était pas significative. Il est donc difficile d'en tirer une conclusion. Le groupe *rétention 48 h* a, quant à lui, démontré une amélioration de la performance moyenne de 4 % entre les deux blocs. Cela signifie qu'aucune interférence rétrograde n'a été identifiée pour ce groupe. La différence entre les deux blocs n'était pas non plus significative. L'évolution de la performance entre l'apprentissage initial et le test de rétention est donc légèrement différente entre les deux groupes, mais pas de façon significative. Les deux groupes étaient soumis aux mêmes conditions durant les tâches motrices ainsi que les blocs TMS. L'unique différence était la durée de l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial et le test de rétention. Cela nous amène vers le second objectif principal de ce travail, qui avait pour but de déterminer si la durée de l'intervalle de rétention jouait un rôle pour observer de l'interférence rétrograde. Rappelons que le groupe *rétention immédiate* a effectué le test de rétention environ 90 minutes après l'apprentissage initial, alors que pour le groupe *rétention 48 h*, le test de rétention a été réalisé deux jours après l'apprentissage initial. D'après les résultats observés, aucune interférence rétrograde significative n'a été observée pour les deux groupes ainsi qu'aucune différence significative entre l'évolution de la performance de la tâche BT des deux groupes. Ceci ne nous permet donc pas de clarifier si l'intervalle de rétention joue un rôle pour observer de l'interférence rétrograde et si l'interférence qui aurait potentiellement pu être observée, est uniquement un effet à court terme ou une perturbation de la consolidation à long terme.

Des études ont déjà démontré par le passé qu'une tâche de précision pouvait avoir un effet d'interférence rétrograde sur l'apprentissage initial d'une tâche balistique (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011).

Comme aucune interférence rétrograde n'a été observée pour le groupe *rétention 48 h* et que la faible interférence constatée pour le groupe *rétention immédiate* n'est pas soutenue par un effet significatif, il a fallu remettre en question le protocole de cette étude. Est-ce que les conditions essentielles à l'interférence rétrograde ont bien été respectées ?

Les résultats présentés sur la Figure 5 et la Figure 6 montrent une amélioration de la performance lors de l'apprentissage initial de la tâche BT pour les deux groupes. Une différence significative a été décelée entre le RFD moyen en début et en fin d'entrainement. Cependant, pour le test de rétention, aucune différence significative entre le RFD moyen en début et en fin d'entrainement n'a été détectée pour les deux groupes. Le manque d'amélioration pendant le test de rétention pourrait être expliqué par le fait que le RFD moyen atteint à la fin de l'apprentissage initial était plus élevé que le niveau de base, les sujets commençaient donc le test de rétention avec un RFD plus élevé, ce qui nécessitait plus d'énergie et pouvait mener plus rapidement à de la fatigue au cours de l'entrainement. Il était donc plus difficile pour le sujet d'améliorer sa performance pendant le test de rétention. Malgré cela, l'amélioration significative de la performance durant l'apprentissage initial a démontré que la tâche BT était bien une tâche d'apprentissage. De ce fait, une trace mnésique liée à la tâche a été créée et elle était susceptible d'être perturbée dans sa consolidation. Concernant la deuxième tâche, la tâche VMT, une amélioration de la performance lors de l'apprentissage initial ainsi que lors du test de rétention a été observée (Figure 3 et Figure 4). L'amélioration a été confirmée par une différence significative entre l'erreur moyenne commise en début et en fin d'entrainement, ceci pour les deux groupes. La réduction de l'erreur moyenne lors des entrainements permet d'affirmer que la tâche VMT a été apprise. La tâche d'interférence est donc également une tâche d'apprentissage et sa trace mnésique aurait pu (en théorie) interférer avec celle créée lors de l'apprentissage de la tâche BT. Ainsi, la première condition qui est que les deux tâches motrices doivent être des tâches d'apprentissage a été respectée (Lundbye-Jensen et al., 2011).

Une deuxième condition essentielle pour qu'une interférence rétrograde puisse avoir lieu est que l'apprentissage de la tâche d'interférence se fasse immédiatement après l'apprentissage de la tâche d'apprentissage (Lundbye-Jensen et al., 2011). Dans notre étude, la tâche d'interférence (tâche VMT) n'a pas pu être effectué immédiatement après l'apprentissage initial de la tâche BT à cause du bloc TMS 2. La durée entre l'apprentissage initial de la tâche BT et l'exécution de la tâche VMT était donc de 30-45 minutes. Il se pourrait que la trace mnésique de la tâche BT ait déjà été partiellement consolidée durant cet intervalle de temps qui est plus long que si la tâche d'interférence avait été effectuée dans l'immédiat. En particulier, l'intervalle de temps était plus long que dans les études de Lauber (2013) et Lundbye-Jensen (2011) ainsi que leurs

collègues, dans lesquelles l'apprentissage de la tâche d'interférence était réalisé seulement quelques minutes après l'apprentissage initial de la tâche BT. Cependant, cela reste toujours une fenêtre temporelle réduite par rapport aux 4 à 6 heures requises pour que la trace mnésique de la tâche BT soit complétement consolidée (Brashers-Krug et al., 1996 ; Lundbye-Jensen et al., 2011 ; Shadmehr & Holcomb, 1997). De ce fait, cette condition essentielle à l'interférence rétrograde a partiellement été respectée.

Ce qui pourrait également expliquer qu'aucune interférence rétrograde significative n'ait été observée est qu'une troisième condition essentielle n'ait pas totalement été respectée. Pour rappel, les deux tâches motrices doivent impliquer la même direction de mouvement et ainsi solliciter les mêmes muscles afin que les mêmes circuits neuronaux moteurs soient engagés (Lundbye-Jensen et al., 2011). Dans ce travail, bien que la tâche BT et la tâche VMT impliquaient les muscles fléchisseurs du poignet, le type de contraction était différent pour les deux tâches motrices. Pour la tâche BT, il s'agissait de contractions isométriques alors que la tâche VMT impliquait une alternance entre des contractions concentriques et excentriques (dû à la résistance des élastiques de l'engin utilisé pour la tâche). Ceci constitue donc une différence par rapport aux études présentées dans l'introduction (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011). En effet, dans ces travaux, les deux tâches motrices (tâche d'apprentissage et tâche d'interférence) impliquaient le même type de contraction, à savoir des contractions isométriques. Il est donc possible que dans notre étude, des circuits neuronaux moteurs légèrement différents aient été engagés durant les deux tâches motrices, ne permettant pas l'interférence entre les changements synaptiques liées à la consolidation des tâches.

Pour terminer, une dernière raison pourrait expliquer qu'une interférence rétrograde de la tâche VMT sur la tâche BT n'ait pas été observée dans cette étude. Durant chaque bloc TMS, les participants ont non seulement reçu des stimulations durant une condition « active » (à savoir lors d'une contraction isométrique du FCR, comme expliqué plus haut), mais également lors d'une condition « pendant la tâche » (les données issues de cette condition n'ayant pas été prises en compte pour ce travail). Lors de cette condition, les participants recevaient des stimulations pendant l'exécution de contractions isométriques rapides qui ressemblaient aux contractions effectuées lors de la tâche BT. Comme le bloc TMS 3 était effectué avant le test de rétention, il se pourrait qu'une interférence rétrograde de la tâche VMT sur la tâche BT ait été visible uniquement pendant ces contractions rapides effectuées au sein du bloc TMS 3, le participant retrouvant ensuite son niveau pour le début du test de rétention. Néanmoins, cela reste une hypothèse car les contractions isométriques rapides effectuées lors de la condition « pendant la tâche » n'étaient pas maximales contrairement à celles exécutées lors de la tâche BT.

### 4.2 Paramètres neurophysiologiques

L'objectif secondaire de ce travail avait pour but d'évaluer les changements de l'excitabilité corticospinale du FCR durant l'apprentissage de la tâche BT. Pour ce faire, différents paramètres de l'excitabilité corticospinale ont été mesurés. Concernant les seuils moteurs, aucune différence significative n'a été observé entre les RMTs des blocs TMS 1, TMS 2 et TMS 3 pour les deux groupes (*rétention immédiate* et *rétention 48 h*). Par contre, les AMTs étaient significativement plus bas lors des blocs TMS 1 et TMS 2 que lors du bloc TMS 3 pour le groupe *rétention immédiate*. Concernant les amplitudes (exprimées en % de la M-Max) des MEPs mesurés en activité, bien qu'aucune différence significative n'ait été observée, une tendance vers une amplitude des MEPs moyenne plus basse lors du bloc TMS 3 a été constatée (surtout liée à la baisse de l'amplitude des MEPs du groupe *rétention 48 h* ; Tableau 2). Ensemble ces deux résultats décrivent une possible légère diminution de l'excitabilité corticospinale durant le bloc TMS 3. Il se pourrait que les sujets se soient habitués à la TMS après les deux premiers blocs de stimulations et que, de ce fait, l'excitabilité corticospinale ait diminué au cours du troisième bloc de TMS. L'apprentissage initial de la tâche BT n'a, quant à lui, démontré aucun effet significatif concernant l'amplitude brute des MEPs entre les blocs TMS 1 et TMS 2. L'hypothèse que l'apprentissage d'une tâche BT soit associé à une augmentation de l'excitabilité corticospinale n'est donc pas soutenue par les résultats obtenus dans ce travail. Néanmoins, il est difficile de pouvoir évaluer l'excitabilité corticospinale uniquement avec les seuils moteurs et trois blocs de 20 stimulations single-pulse de même intensité. La TMS étant une méthode de mesure avec une grande variabilité, il est nécessaire d'effectuer de nombreuses stimulations pour obtenir des résultats interprétables et robustes. Les chercheurs des études citées en introduction ont pour la plupart effectué un plus grand nombre de stimulations single-pulse et ceci avec différentes intensités : 90-150% du RMT (Ruddy et al., 2016) et 110-130% du RMT ainsi que la stimulation maximal du stimulateur (Caroll et al. 2008). Les différentes intensités de stimulations leur ont permis de créer une courbe de recrutement qui représente l'augmentation de l'amplitude du MEP en fonction de l'augmentation de l'intensité de la TMS, ce qui constitue une mesure plus complète de l'excitabilité corticospinale. De plus, la stimulation single-pulse à elle seule ne permet pas de distinguer les modifications de l'excitabilité corticale, sous-corticale et spinale. Elle ne va pas activer sélectivement les éléments corticospinaux, intracorticaux et transcorticaux, mais plutôt les activer tous les trois à des degrés divers (Bestmann & Krakauer, 2015 ; Chen, 2000). Comme ces différents éléments contribuent aux MEPs, il est difficile d'interpréter des changements d'amplitude des MEPs uniquement à l'aide de stimulations single-pulse. Des protocoles de stimulations spécifiques, comme par exemple les protocoles

contenant des stimulations « paired-pulse », peuvent isoler les différentes contributions aux MEPs et permettent ainsi d'identifier à quel niveau (intracortical, transcortical ou spinal) le changement se produit (Bestmann & Krakauer, 2015). Un exemple de protocole contenant des stimulations paired-pulse est le protocole appelé « short-interval intracortical inhibition » (SICI), qui reflète l'influence des interneurones inhibiteurs situés dans le cortex moteur (Hallett, 2007). Comme le dit le nom, deux stimulations sont envoyées l'une après l'autre avec un intervalle court (moins de 5 millisecondes) : un premier stimulus initial d'intensité suffisamment grande pour activer des neurones corticaux (dont des interneurones inhibiteurs) mais ne pas provoquer de MEP (« subthreshold stimulus »), et un deuxième stimulus de plus grande intensité afin de provoquer un MEP (« suprathreshold stimulus »). Les influences intracorticales initiées par le premier stimulus vont alors moduler l'amplitude du MEP provoqué par le deuxième stimulus, permettant ainsi de mesurer le niveau d'inhibition intracorticale (Hallett, 2007).

En résumé, il n'y a pas eu de relation observable entre l'excitabilité corticospinale du FCR et l'apprentissage de la tâche BT. Pour augmenter la probabilité d'observer une relation entre l'excitabilité corticospinale et l'apprentissage de la tâche BT, il aurait été bénéfique de prendre en compte les autres mesures TMS effectuées (comme par exemple les stimulations single-pulse délivrées lors de la condition « pendant la tâche », ainsi que les données issues des protocoles SICI) mais qui n'étaient pas dédiées à ce travail. Elles auraient permis d'expliquer de façon plus précise les changements d'amplitude des MEPs et peut-être d'identifier une tendance au niveau de l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage de la tâche BT.

### 4.3 Limites et améliorations de l'étude

Comme énoncé auparavant, une hypothèse pour expliquer l'absence d'interférence rétrograde significative de la tâche VMT sur la tâche BT dans cette étude pourrait être la manière dont la tâche VMT a été exécutée, car cette dernière impliquait un autre type de contraction que lors de la tâche BT. Afin d'augmenter la probabilité d'observer une interférence rétrograde, il serait pertinent de modifier le protocole de l'étude de sorte que la tâche VMT implique le même type de contraction que la tâche BT, à savoir des contractions isométriques. De cette manière, les mêmes circuits neuronaux moteurs seraient engagés pour les deux tâches motrices. Pour ce faire, la position du curseur durant la tâche VMT pourrait être contrôlée par la contraction isométrique des muscles fléchisseurs du poignet. Ce serait donc la force (la pression appliquée) qui permettrait de bouger le curseur à l'écran. Cela augmenterait la similarité entre les deux tâches motrices. C'est d'ailleurs de cette façon que Lauber (2013) et Lunbye-Jensen (2011) ainsi que leurs collègues ont procédé pour l'exécution de la tâche d'interférence de précision.

Ensuite, la partie TMS, qui était nécessaire à l'atteinte de l'objectif secondaire, a peut-être perturbé l'objectif principal de l'étude. D'une part, l'exécution de la tâche d'interférence a été retardée à cause du bloc TMS 2 et ne s'est donc pas faite dans l'immédiat après l'apprentissage initial de la tâche BT. D'autre part, il se peut que les effets d'une interférence rétrograde de la tâche VMT sur la tâche BT se soient produits uniquement durant le bloc TMS 3 lors de la condition « pendant la tâche », peu avant le test de rétention. Ainsi, pour des études futures, il serait préférable de se concentrer uniquement sur l'objectif principal qui est l'interférence rétrograde et d'effectuer la TMS séparément sur un autre groupe qui apprend uniquement la tâche BT, afin d'évaluer l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage.

Enfin, il serait intéressant d'ajouter un groupe contrôle à cette étude, qui effectuerait uniquement la tâche BT. De cette manière, les résultats des groupes *rétention immédiate* et *rétention 48 h* pourraient potentiellement être interprétés différemment. En effet, si ce groupe contrôle montrait de grands « off-line improvements » au test de rétention de la tâche BT, il se pourrait que les résultats moins élevés au test de rétention de la tâche BT chez les deux groupes mesurés dans cette étude soient dus à de l'interférence rétrograde provoqué par la tâche VMT. Cela reste une hypothèse intéressante à évaluer dans le futur.

# 5 Conclusion

Cette étude avait comme premier objectif principal de déterminer si un effet d'interférence rétrograde est observé lors de l'apprentissage successif d'une tâche balistique et d'une tâche de précision impliquant les muscles fléchisseurs du poignet. Les résultats des deux groupes (*rétention immédiate* et *rétention 48 h*) n'ont indiqué aucun effet d'interférence rétrograde significatif de la tâche de précision (tâche VMT) sur l'apprentissage de la tâche BT. Comme aucune interférence rétrograde n'a été observée et qu'aucune différence significative entre l'évolution de la performance de la tâche BT des deux groupes n'a été constatée, il a été impossible de clarifier si l'intervalle de temps entre l'apprentissage initial et le test de rétention avait un effet sur l'interférence rétrograde, ce qui était le second objectif principal de cette étude. Les hypothèse pouvant expliquer l'absence d'interférence rétrograde significative sont les suivantes : premièrement, le retardement de l'exécution de la tâche d'interférence à cause du bloc TMS 2, a peut-être permis une consolidation partielle de la trace mnésique de la tâche BT ; deuxièmement, les effets de l'interférence rétrograde de la tâche VMT sur la tâche BT ont été peut-être uniquement visibles durant les contractions rapides effectuées au sein du bloc TMS 3 lors de la condition « pendant la tâche » ; troisièmement, il manquait de similarité au niveau du type de contractions musculaires entre la tâche VMT (impliquant une alternance entre des contractions concentriques et excentriques) et la tâche BT (impliquant des contractions isométriques), engageant alors éventuellement des circuits neuronaux moteurs légèrement différents durant les deux tâches motrices, ne permettant pas l'interférence entre les changements synaptiques liées à la consolidation des tâches. Contrairement à cette étude, dans les études ayant déjà démontré par le passé qu'une tâche de précision avait un effet d'interférence rétrograde sur l'apprentissage initial d'une tâche balistique, la tâche d'interférence était exécutée immédiatement après l'apprentissage initial de la tâche BT et les deux tâches (tâche BT et tâche de précision) impliquaient le même type de contraction, à savoir des contractions isométriques (Lauber et al., 2013 ; Lundbye-Jensen et al., 2011).

L'objectif secondaire de cette étude, avait pour but d'évaluer l'évolution de l'excitabilité corticospinale du FCR durant l'apprentissage de la tâche BT. L'hypothèse que l'apprentissage d'une tâche BT soit associé à une augmentation de l'excitabilité corticospinale n'a pas été soutenue par les résultats obtenus. Mise à part une possible légère diminution de l'excitabilité corticospinale durant le bloc TMS 3, aucune tendance n'a été observée concernant l'amplitude des MEPs et les seuils moteurs mesurés au sein du FCR. La TMS étant une méthode de mesure avec une grande variabilité, il aurait été pertinent d'effectuer un plus grand nombre de

stimulations et ceci à des intensités différentes pour obtenir des résultats plus intéressants. Afin d'expliquer plus finement les changements d'amplitude des MEPs et d'éventuellement identifier une tendance au niveau de l'excitabilité corticospinale durant l'apprentissage de la tâche BT, il aurait été judicieux de prendre en compte les autres mesures TMS effectués (les données issues des protocoles SICI) mais qui n'étaient pas dédiées à ce travail.

Afin d'étayer cette étude, il serait intéressant d'ajouter un groupe contrôle qui effectuerait uniquement la tâche BT, pour comparer l'évolution de la performance de ce groupe avec celle des deux groupes mesurés dans cette étude. Nous avons émis l'hypothèse que les blocs TMS 2 et TMS 3 pouvaient être à l'origine de l'absence d'interférence de la tâche VMT sur la tâche BT. Pour de futures études, il serait donc préférable de se concentrer uniquement sur l'objectif principal (l'interférence rétrograde) et d'utiliser la TMS séparément sur un autre groupe apprenant uniquement la tâche BT.

## Bibliographie


Bagce, H. F., Saleh, S., Adamovich, S. V., Krakauer, J. W., & Tunik, E. (2013). Corticospinal excitability is enhanced after visuomotor adaptation and depends on learning rather than performance or error. *Journal of Neurophysiology*, *109*(4), 1097–1106. https://doi.org/10.1152/jn.00304.2012

Bestmann, S., & Krakauer, J. W. (2015). The uses and interpretations of the motor-evoked potential for understanding behaviour. *Experimental Brain Research*, *233*(3), 679–689. https://doi.org/10.1007/s00221-014-4183-7

Bliss, T. V. P., & Cooke, S. F. (2011). Long-term potentiation and long-term depression: A clinical perspective. *Clinics*, *66*(SUPPL.1), 3–17. https://doi.org/10.1590/S1807-59322011001300002

Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, *382*(6588), 252–255. https://doi.org/10.1038/382252a0

Cahill, L., McGaugh, J. L., & Weinberger, N. M. (2001). The neurobiology of learning and memory: Some reminders to remember. *Trends in Neurosciences*. *24*(10), 578–581. https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01885-3

Carroll, T. J., Lee, M., Hsu, M., & Sayde, J. (2008). Unilateral practice of a ballistic movement causes bilateral increases in performance and corticospinal excitability. *Journal of Applied Physiology*, *104*(6), 1656–1664. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01351.2007

Carson, R. G., Ruddy, K. L., & McNickle, E. (2016). What do TMS-evoked motor potentials tell us about motor learning ? Dans J. Laczko, & M. L. Latash (éd.), *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 957, pp. 143–157). Springer New York LLC. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47313-0_8

Chen, R. (2000). Studies of human motor physiology with transcranial magnetic stimulation. *Muscle & Nerve, Supplement 9*, 26-32. https://doi.org/10.1002/1097-4598(2000)999:9<::AID-MUS6>3.0.CO;2-I

Christiansen, L., Madsen, M. J., Bojsen-Møller, E., Thomas, R., Nielsen, J. B., & Lundbye-Jensen, J. (2018). Progressive practice promotes motor learning and repeated transient increases in corticospinal excitability across multiple days. *Brain Stimulation*, *11*(2), 346–357. https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.005

Di Rienzo, F., Debarnot, U., Daligault, S., Saruco, E., Delpuech, C., Doyon, J., Collet, C., & Guillot, A. (2016). Online and offline performance gains following motor imagery practice: A comprehensive review of behavioral and neuroimaging studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. Article 315 https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00315

Floyer-Lea, A., Wylezinska, M., Kincses, T., & Matthews, P. M. (2006). Rapid modulation of GABA concentration in human sensorimotor cortex during motor learning. *Journal of Neurophysiology*, *95*(3), 1639–1644. https://doi.org/10.1152/jn.00346.2005

Goedert, K. M., & Willingham, D. B. (2002). Patterns of interference in sequence learning and prism adaptation inconsistent with the consolidation hypothesis. *Learning and Memory*, *9*(5), 279–292. https://doi.org/10.1101/lm.50102

Hallett, M. (2007). Transcranial magnetic stimulation: a primer. *Neuron*, *55*(2), 187–199. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.06.026

Harms, K. J., Rioult-Pedotti, M. S., Carter, D. R., & Dunaevsky, A. (2008). Transient spine expansion and learning-induced plasticity in layer 1 primary motor cortex. *Journal of Neuroscience*, *28*(22), 5686–5690. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0584-08.2008

Kantak, S. S., & Winstein, C. J. (2012). Learning-performance distinction and memory processes for motor skills: A focused review and perspective. *Behavioural Brain Research*, *228*(1), 219–231. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.11.028

Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1998). The acquisition of skilled motor performance: Fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*(3), 861–868. https://doi.org/10.1073/pnas.95.3.861

Kleim, J. A., Hogg, T. M., VandenBerg, P. M., Cooper, N. R., Bruneau, R., & Remple, M. (2004). Cortical synaptogenesis and motor map reorganization occur during late, but not early, phase of motor skill learning. *Journal of Neuroscience*, *24*(3), 628–633. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3440-03.2004

Krakauer, J. W. (2009). Motor learning and consolidation: The case of visuomotor rotation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *629*, 405–421. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2_21

Krakauer, J. W., & Shadmehr, R. (2006). Consolidation of motor memory. *Trends in Neuro-Sciences*, *382*(6588), 252–255. https://doi.org/10.1016/j.tins.2005.10.003

Lauber, B., Lundbye-Jensen, J., Keller, M., Gollhofer, A., Taube, W., & Leukel, C. (2013). Cross-limb interference during motor learning. *PLoS ONE*, *8*(12), Article e81038 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081038

Lee, M., Hinder, M. R., Gandevia, S. C., & Carroll, T. J. (2010). The ipsilateral motor cortex contributes to cross-limb transfer of performance gains after ballistic motor practice. *Journal of Physiology*, *588*(1), 201–212. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.183855

Liepert, J., Classen, J., Cohen, L. G., & Hallett, M. (1998). Task-dependent changes of intracortical inhibition. *Experimental Brain Research*, *118*(3), 421–426. https://doi.org/10.1007/s002210050296

Lundbye-Jensen, J., Marstrand, P. C. D., & Nielsen, J. B. (2005). Motor skill training and strength training are associated with different plastic changes in the central nervous system. *Journal of Applied Physiology*, *99*(4), 1558–1568. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01408.2004

Lundbye-Jensen, J., Petersen, T. H., Rothwell, J. C., & Nielsen, J. B. (2011). Interference in ballistic motor learning: Specificity and role of sensory error signals. *PLoS ONE*, *6*(3). Article e17451. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017451

Muellbacher, W., Zlemann, U., Wissel, J., Dang, N., Kofler, M., Facchini, S., Boroojerdi, B., Poewe, W., & Hallett, M. (2002). Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature*, *415*(6872), 640–644. https://doi.org/10.1038/nature712

Robertson, E. M. (2009). From creation to consolidation: A novel framework for memory processing. *PLoS Biology*, *7*(1), Article e1000019. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000019

Robertson, E. M., & Cohen, D. A. (2006, June). Understanding consolidation through the architecture of memories. *Neuroscientist*, 12(3), 261–271. https://doi.org/10.1177/1073858406287935

Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Miall, R. C. (2004). Current concepts in procedural consolidation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(7), 576–582. https://doi.org/10.1038/nrn142

Ruddy, K. L., Rudolf, A. K., Kalkman, B., King, M., Daffertshofer, A., Carroll, T. J., & Carson, R. G. (2016). Neural adaptations associated with interlimb transfer in a ballistic wrist flexion task. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, Article 204. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00204

Sakamoto, T., & Kondo, T. (2015). Visuomotor learning by passive motor experience. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, Article 279. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00279

Schmidt, R. A., & Bjork, R. A. (1992). New conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*, *3*(4), 207–217. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00029.x

Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *Journal of Neuroscience*, *17*(1), 409–419.

https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-01-00409.1997

Shadmehr, R., & Holcomb, H. H. (1997). Neural correlates of motor memory consolidation. *Science*, *277*(5327), 821–825. https://doi.org/10.1126/science.277.5327.821

Tallet, J., Albaret, J.-M., & Rivière, J. (2015). The role of motor memory in action selection and procedural learning: insights from children with typical and atypical development. *Socioaffective Neuroscience & Psychology*, *5*(1), Article 28004. https://doi.org/10.3402/snp.v5.28004

Walker, M. P., Brakefield, T., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2003). Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature*, *425*(6958), 616–620. https://doi.org/10.1038/nature01930

Wigmore, V., Tong, C., & Flanagan, J. R. (2002). Visuomotor rotations of varying size and direction compete for a single internal model in motor working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*(2), 447–457. https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.2.447

Ziemann, U., Iliać, T. V., Pauli, C., Meintzschel, F., & Ruge, D. (2004). Learning modifies subsequent induction of long-term potentiation-like and long-term depression-like plasticity in human motor Cortex. *Journal of Neuroscience*, *24*(7), 1666–1672. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5016-03.2004

# Annexe

## Annexe 1

UNI FR
UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Department of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

**INFORMATIONS AUX VOLONTAIRES**

**La consolidation lors de l'apprentissage de deux tâches motrices**

Cette étude est organisée par: Prof. Dr. phil. Wolfgang Taube, Université de Fribourg

Madame, Monsieur,

Nous vous proposons de participer à notre projet de recherche, qui s'intéresse à la consolidation lors de l'apprentissage de deux tâches motrices. Cette feuille d'information décrit le projet.

### 1. Objectifs de l'étude

Notre cerveau a la capacité de former de nouveaux contenus de mémoire via de l'entrainement. On distingue deux phases lors de la formation d'un contenu mnésique : l'encodage, au début de l'apprentissage, et la consolidation, qui suit la phase d'encodage et qui nous permet de retrouver des contenus de mémoire longtemps après l'encodage. Cette phase de consolidation sera étudiée dans le cadre de ce projet de recherche.
Plus précisément, cette étude vise à analyser la phase de consolidation de la mémoire motrice lors de l'apprentissage successif de deux tâches motrices distinctes. Des mécanismes d'inhibition, mesurés au sein du cerveau et impliqués dans la phase de consolidation, seront également évalués.

### 2. Sélection des personnes pouvant participer à l'étude

La participation est ouverte à toutes les personnes qui ont entre 18 et 45 ans, qui sont en bonne santé et qui **ne remplissent pas** l'un des critères d'exclusion suivants:

- Personnes ayant consommé de l'alcool dans les 24 heures précédant la session de mesure
- Personnes avec des implants cérébraux ou cochléaires
- Personnes avec un pacemaker
- Personnes avec un trouble neurologique ou psychiatrique diagnostiqué
- Personnes ayant des crises d'épilepsie ou des antécédents familiaux de crise d'épilepsie
- Personnes souffrant/ayant soufferts de lésions cérébrales
- Grossesse

### 3. Déroulement pour les participant-e-s

En cas de décision de participation à l'étude, chaque participant-e devra se rendre une fois au laboratoire pour une session qui durera environ 4 heures. Au début de la session, vous devrez répondre au questionnaire reçu avec ce document pour déterminer si vous pouvez participer à l'étude (*Questionnaire d'admissibilité*).
Durant la session, chaque participant-e devra s'entraîner à la réalisation de deux tâches motrices (tâche balistique et tâche visuomotrice) impliquant les muscles du poignet de la main

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Department of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

non-dominante. De plus, divers paramètres neurophysiologiques seront évalués à l'aide des méthodes de mesure présentées plus loin.

Voici le déroulement lors de la visite :

- *Questionnaire d'admissibilité*: seuls les participant-e-s admissibles poursuivront le protocole
- Neurostimulation électrique transcutanée du nerf médian, un nerf de l'avant-bras innervant les muscles fléchisseurs du poignet
- Stimulations magnétiques transcrâniennes
- Entraînement de la tâche balistique. Cette tâche consiste à produire une force maximale avec les muscles fléchisseurs de votre poignet, et ce le plus rapidement possible. 35 essais sont effectués, avec 30 s de pause entre chaque essai
- Stimulations magnétiques transcrâniennes
- Entraînement de la tâche visuomotrice. Cette tâche consiste à suivre avec un curseur une courbe tracée sur un écran. La position du curseur est liée à la flexion/extension de votre poignet (de la main non-dominante). Le but est de suivre la ligne le plus précisément possible. 50 essais de 11 s chacun sont effectués, avec 30 s de pause entre chaque essai
- Stimulations magnétiques transcrâniennes
- Entraînement de la tâche balistique (35 essais)
- Entraînement de la tâche visuomotrice (15 essais)
- Fin de la session et de l'étude

Toutes les tâches motrices seront effectuées sur l'engin de la figure 1.

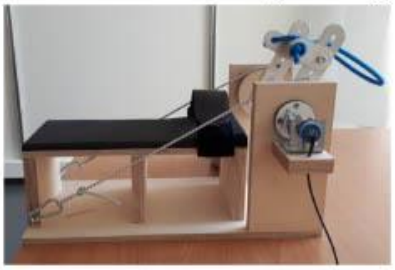


Figure 1. Engin utilisé dans cette étude.

En tant que participant-e, votre **objectif** est d'atteindre la **meilleure performance possible dans les deux tâches motrices**. Il est donc très important de réaliser chaque **entraînement** avec une **concentration maximale**, afin de **maximiser l'apprentissage des deux tâches motrices**.

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Department of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

Présentation des méthodes de mesure :

- Electromyographie de surface (EMG).
  Les muscles, lorsqu'ils se contractent, génèrent une activité électrique. L'EMG de surface est une technique qui permet d'enregistrer cette activité électrique. Pour ce faire, des électrodes sont collées sur la peau, au-dessus du muscle ciblé, et l'activité électrique est enregistrée sur un ordinateur. Afin d'enregistrer un signal de bonne qualité, la peau doit être préparée avant la pose des électrodes. Cela consiste en un rasage, une application d'un gel abrasif et un nettoyage à l'alcool. Cette opération peut éventuellement conduire à des irritations cutanées superficielles. L'EMG est donc une technique non-invasive, pour laquelle il n'existe, à ce jour, aucun effet secondaire connu.

- Stimulation magnétique transcrânienne (SMT).
  La SMT consiste en de très brèves impulsions électriques déchargées au sein d'une bobine de stimulation placée sur la tête, au contact du cuir chevelu. Ces impulsions électriques génèrent un champ magnétique, qui traverse les os du crâne et pénètre dans le tissu cérébral superficiel. À cet endroit, ce champ magnétique génère alors de faibles courants électriques, ce qui permet de stimuler les neurones situés sous la bobine. Lorsque les impulsions de la SMT sont délivrées sur la zone du cerveau responsable de l'exécution des mouvements volontaires, cela provoque une petite contraction musculaire. La SMT est donc une méthode de stimulation cérébrale non-invasive.

- Neurostimulation transcutanée électrique.
  Un système de neurostimulation transcutanée électrique est composé d'une cathode et d'une anode. Ces deux électrodes sont collées sur la peau, à des endroits précis permettant de stimuler un nerf particulier. Pour ce faire, de brefs courants électriques sont émis et circulent de la cathode à l'anode, en passant par les tissus corporels. Ces courants électriques sont alors capables de stimuler les nerfs qu'ils traversent, engendrant une contraction des muscles innervés par ces nerfs. La neurostimulation transcutanée électrique est donc une méthode de stimulation nerveuse non-invasive.

## 4. Bénéfices pour les participant-e-s

Les participant-e-s ne tireront aucun bénéfice direct de l'étude.

## 5. Droits du participant / de la participante

Vous devez prendre part à cette étude uniquement selon votre propre volonté. Personne n'est en droit de vous y pousser ou de vous influencer de quelques manières que ce soit. Vous êtes donc libre d'accepter ou de refuser de participer à l'étude, sans justifications. Si vous décidez de participer à l'étude, vous signerez un formulaire de consentement, présent en fin de document. Même après avoir signé ce formulaire, vous restez libre de vous retirer de l'étude à n'importe quel moment, sans donner de raison. Vous n'avez donc pas à justifier vos décisions.
Si vous êtes étudiant ou employé à l'Université de Fribourg, la décision de vous retirer de l'étude ou de ne pas y participer n'a aucune conséquence sur vos études ou sur votre engagement à l'Université.

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Department of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

Vous pouvez à tout moment poser toutes les questions nécessaires au sujet de l'étude. Veuillez vous adresser pour ce faire à la personne indiquée à la fin de la présente feuille d'information.

## 6. Obligations des participant-e-s

Si vous décidez de participer à l'étude, vous êtes tenus de répondre de façon exacte aux questionnaires. De plus, vous devrez respecter les critères d'exclusion présentés dans ce document, et informer l'équipe de l'étude en cas de changement les concernant.

## 7. Risques et contraintes pour les participant-e-s

*Stimulation magnétique transcrânienne*
Bien que la stimulation magnétique transcrânienne soit une procédure de routine dans la pratique clinique, on ne peut pas l'appliquer sur tout le monde. Lors de la considération des conditions de participation, les personnes risquant des effets secondaires sérieux sont exclues (voir les critères d'exclusion au point 2).
En dehors de ces effets secondaires, les stimulations magnétiques transcrâniennes peuvent être accompagnées de maux de têtes passagers. Cela est dû à l'activation de muscles environnant du crâne lors des stimulations.

*Neurostimulation électrique transcutanée*
Les neurostimulations électriques transcutanées peuvent être inconfortables, voir un peu douloureuses. Ces douleurs disparaissent cependant rapidement. Il n'y a pas d'autres effets néfastes connus liés à cette méthode.

*Électromyographie de surface*
Hormis les irritations cutanées superficielles qui peuvent survenir dans certains cas, il n'existe, à ce jour, aucun effet secondaire connu pour l'électromyographie de surface.

## 8. Découvertes

L'investigateur vous avisera pendant l'étude de toute nouvelle découverte susceptible d'influer sur les bénéfices de l'étude ou votre sécurité.
Toute découverte fortuite survenant durant l'étude et pertinente pour votre santé vous sera communiquée.

## 9. Confidentialité des données

Nous serons amenés, pour les besoins de l'étude, à enregistrer vos données personnelles. Ces données seront toutefois codées. Le codage signifie que toutes les données permettant de vous identifier (nom, date de naissance, etc.) sont remplacées par un code, de sorte que les personnes ne connaissant pas ce code ne peuvent pas lier ces données à votre personne. Vos données sont ainsi traitées de façon anonyme. Au sein de l'Université de Fribourg, seules les personnes autorisées et clairement désignées auront accès à ces données, y compris sous forme non codée. Le code reste en permanence au sein de l'institution.
Toutes les personnes impliquées dans l'étude de quelque manière que ce soit sont tenues au secret professionnel et à une confidentialité absolue. Votre nom n'apparaîtra jamais sur Internet ou dans une publication.

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Department of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

**10. Retrait de l'étude**

Vous pouvez à tout moment vous retirer du projet si vous le souhaitez. Les données personnelles recueillies jusque-là seront analysées malgré tout.

**11. Compensation des participant-e-s**

Vous ne recevrez aucune compensation pour la participation à cette étude.

**12. Réparation des dommages subis**

Les dommages de santé que vous pourriez subir du fait de cette étude relèvent de la responsabilité de l'organisme qui l'a initiée et est en charge de sa réalisation (le promoteur). Les conditions et la procédure sont fixées par la loi.
L'université de Fribourg a conclu une assurance auprès de la compagnie *Bâloise Assurances* (avenue de la Gare 7, 1701 Fribourg) pour être en mesure de réparer les dommages relevant de sa responsabilité. Si vous avez subi un dommage, veuillez vous adresser au promoteur de l'étude.

**13. Interlocuteurs**

En cas de doute, de craintes ou de questions avant, pendant ou après l'étude, vous pouvez vous adresser à tout moment à l'un des interlocuteurs suivants:

Joachim Tinguely (étudiant)
Université de Fribourg
Email: joachim.tinguely@unifr.ch
Tél.: +41 76 595 08 06

Investigateurs :
Matteo Bugnon (doctorant)
Université de Fribourg
Section Médecine
Département des Neurosciences et Sciences du Mouvement
Bureau F440
Boulevard de Pérolles 90, 1700 Fribourg, Suisse
Email: matteo.bugnon@unifr.ch
Tél.: +41 79 534 70 50

## Annexe 2

UNI FR
UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Departement of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

**Questionnaire pour la participation à l'étude « *la consolidation lors de l'apprentissage de deux tâches motrices* »**

Le présent questionnaire porte sur diverses questions personnelles qui nous permettront de déterminer si vous pouvez participer à l'étude. **Veuillez s'il vous plaît répondre aux questions de façon exacte**. Vos réponses seront **codées** et traitées de façon **strictement confidentielle**. **Aucune donnée ne sera transmise à des tiers**, et seules les personnes autorisées auront accès à vos réponses.

---

1) Souffrez-vous/ avez-vous souffert d'une maladie neurologique (exemples: **épilepsie**, Alzheimer,…) et/ ou de lésions cérébrales?

Non ☐ Oui ☐

Si oui, laquelle/ lesquelles: _____

2) Souffrez-vous/ avez-vous souffert d'une maladie psychiatrique (exemples: dépression, trouble bipolaire,…)?

Non ☐ Oui ☐

Si oui, laquelle/ lesquelles: _____

3) Souffrez-vous/ avez-vous souffert d'une autre maladie?

Non ☐ Oui ☐

Si oui, laquelle/ lesquelles: _____

4) Possédez-vous des stimulateurs électriques dans votre corps (pacemakers, électrodes cérébraux, implants cochléaires,…)?

Non ☐ Oui ☐

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Departement of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

5) Est-ce que l'un des membres de votre famille a déjà eu dans le passé ou présente actuellement des crises d'épilepsie?

Non ☐ Oui ☐

6) Avez-vous consommé de la drogue, autre que l'alcool, ou des médicaments (y compris les médicaments sans ordonnance) dans les 7 derniers jours?

Non ☐ Oui ☐

Si oui, veuillez nous indiquer de quelle(s) drogue(s)/ de quel(s) médicament(s) il s'agit, ainsi que le jour de la dernière prise: _____

_____

7) Avez-vous consommé de l'alcool dans les dernières 24 heures?

Non ☐ Oui ☐

8) Êtes-vous enceinte?

Non ☐ Oui ☐

FACULTY OF SCIENCE AND MEDICINE
Departement of neurosciences and movement sciences
Bd de Pérolles 90
1700 Fribourg

**Par ma signature, j'atteste l'exactitude des réponses au présent questionnaire:**

| Lieu, date | Signature du participant: |
|---|---|

**Confirmation de l'investigateur:**

| Lieu, date | Nom et prénom de l'investigateur, en majuscules:<br><br>Signature de l'investigateur: |
|---|---|