

Thèse de Doctorat

Justine MAGNARD

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université de Nantes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

École doctorale : ED 504 « Cognition, Éducation, Interactions »

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives, 74^{ème} section

Spécialités : Science du mouvement humain / Psychologie

Unité de recherche : Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » (EA 4334)

UFR STAPS – Université de Nantes

25 bis, boulevard Guy Mollet, BP 72206

44322 Nantes cedex 3

Soutenue le Mercredi 27 Septembre 2017

Inhibition cognitive et fonction sensorimotrice D'une mise à l'épreuve méthodologique à l'exploration des interactions liées au vieillissement

JURY

Président du jury :	Jean-Jacques TEMPRADO , Professeur des Universités, Aix-Marseille Université
Rapporteurs :	Liliane BOREL , Chargée de recherche CNRS, HDR, Aix-Marseille Université Fabienne COLLETTE , Professeure des Universités, Université de Liège
Examineurs :	Philippe ALLAIN , Professeur des Universités, Université d'Angers Jean-Jacques TEMPRADO , Professeur des Universités, Aix-Marseille Université
Invité :	Christophe CORNU , Professeur des Universités, Université de Nantes
Directeur de Thèse :	Thibault DESCHAMPS , Maître de Conférences, HDR, Université de Nantes
Co-directeur de Thèse :	Gilles BERRUT , Professeur des Universités, Praticien hospitalier, Université de Nantes

Abréviations

AQAP : auto-questionnaire d'activité physique

AP : antéropostérieur

_C : congruent

COP : centre de pression

FNM : fuseaux neuromusculaires

ET : écart-type

Fz : composante verticale de la force de réaction au sol

IM : inhibition motrice

IP : inhibition perceptive

ML : médio-latéral

MMSE : questionnaire « *mini-mental state examination* »

MoCA : test « *Montréal cognitive assesement* »

_NC : non-congruent

NS : non-significatif

PAP : premier ajustement postural

PFF : plateforme de force

TAT : temps d'action total

TMT : trail making test

TR : temps de réaction

TRC : temps de réaction de choix

TRS : temps de réaction simple

VTL : vibrations tendineuses localisées

Valorisation

Publications :

Magnard J, Cornu C, Berrut G & Deschamps T. (*acceptée*). Can methodological considerations challenge the dissociation of the perceptual and motor inhibitory processes? *Experimental Psychology*.

Magnard J, Cornu C, Berrut G & Deschamps T. (*under review*). Examination of reactive motor responses to Achilles tendon vibrations during an inhibitory stepping reaction time task. *Human Movement Science*.

Communications orales :

Magnard J, Berrut G, Cornu C & Deschamps T. (2017). *Age-related changes in reactive motor responses to Achilles tendon vibration in an inhibitory stepping reaction time task*. Oral Communication presented during 22^e International Congress of European College of Sport Science. Essen, Germany, 5-8th July 2017.

Magnard J, Cornu C, Couturier C, Berrut G & Deschamps T. (2017). *Inhibition cognitive et fonction sensorimotrice : existe-t-il une interaction spécifique chez la personne âgée ?* Journées Scientifiques 2017 de l'Université de Nantes. Nantes, 2 Juin 2017.

Magnard J, Thibault S, Berrut G, Cornu C, & Deschamps T. (2015). *Processus d'inhibition cognitive et tâche d'initiation de pas : impact du déficit proprioceptif sur la qualité de l'exécution motrice*. 16^e congrès de l'Association des chercheurs en activités physiques et sportives. Nantes, France, 26-28 Octobre 2015.

Magnard J, Cornu C, Berrut G & Deschamps T. (2015). *Performance motrice et processus d'inhibition cognitive : revue des enjeux théoriques et cliniques pour l'évaluation du risque de chute de la personne âgée*. Journées Scientifiques 2015 de l'Université de Nantes. Nantes, 12 Juin 2015.

Communications affichées :

Magnard J, Berrut G, Couturier C, Cornu C & Deschamps T. (2017). *Age differences in reaction time during an inhibitory choice stepping task challenged by a proprioceptive perturbation*. Poster presented during 13^e European Union of Geriatric Medicine Society. Nice, France, 20-22th September 2017.

Magnard J, Berrut G, Cornu C, & Deschamps T. (2015). *Impact de la proprioception sur le processus d'inhibition cognitive mis en jeu lors d'une tâche de contrôle postural statique*. 16^e congrès de l'Association des chercheurs en activités physiques et sportives. Nantes, France, 26-28 Octobre 2015.

Sommaire

Introduction.....	13
--------------------------	-----------

Cadre théorique.....	17
-----------------------------	-----------

I. Attention et fonctions exécutives : des processus cognitifs fondamentaux.	18
.....	
I.1. L'attention	18
I.2. Les fonctions exécutives.....	19
II. L'inhibition.....	25
II.1. Définition	25
II.2. Différentes approches du fonctionnement inhibiteur	26
1. Le modèle de Hasher, Zacks et May (1999).....	28
2. Vers une conception de l'inhibition perceptive et motrice	29
3. L'inhibition perceptive et motrice mesurées par Nassauer & Halperin (2003)	32
III. Effets de l'âge sur l'inhibition	42
III.1 Travaux de Hasher & Zacks (1988).....	43
III.2 Inhibition et vieillissement : des résultats divergents.....	44
1. Déclin des processus inhibiteurs.....	44
2. Conservation des processus inhibiteurs	46
3. Inhibition et vieillissement : une atteinte sélective.....	47
III.3 Inhibition perceptive, inhibition motrice et vieillissement.....	48
1. Apports de Germain & Collette (2008) : temps de réaction et méthode des facteurs additifs	49
2. Apports de variables dépendantes alternatives: temps de réaction vs. scores d'inhibition	51

IV. Effets de l'âge sur la fonction motrice	56
IV.1. Posture, marche et vieillissement	56
IV.2. Fonction neuromusculaire et vieillissement	58
IV.3. Systèmes sensoriels et vieillissement	59
1. Le système visuel.....	59
2. Le système vestibulaire	60
3. Le système proprioceptif	60
IV.4. Système nerveux central et vieillissement	62
V. Interaction entre inhibition et fonction motrice au cours de l'âge	65
V.1. Apports des travaux mobilisant les tests de Stroop ou du Go/NoGo.....	66
1. Apports des études corrélationnelles	66
2. Apports des études mobilisant le paradigme de la double tâche	72
V.2. Apports des travaux mobilisant le paradigme de Nassauer & Halperin (2003).	78
1. Apports des études corrélationnelles	78
2. Apports des études mobilisant une tâche d'initiation du pas.....	82
VI. Résumé, enjeux et problématique	86

Première phase expérimentale..... 89

I. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et quantité d'information	92
I.1. La performance : le produit d'un traitement de l'information	92
I.2. Paradigme de la chronométrie mentale	94
1. Mesure du temps de réaction	94
2. Tâche de temps de réaction simple et tâche de temps de réaction de choix	95
I.3. Quantité d'information	96
I.4. Quantité d'information, inhibition perceptive et inhibition motrice	97
I.5. Problématique	99

I.6. Etude 1: Effets de la quantité d'information et de l'ordre de passation dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003)	100
1. Méthode	100
2. Résultats	110
3. Discussion.....	114
II. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003): contraintes posturales et effecteurs de réponse	120
II.1. Temps de réaction, posture et effecteurs de réponse.....	120
II.2. Problématique.....	121
II.3. Etude 2: Effets de la contrainte posturale et de l'effecteur de réponse mobilisé dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003).....	122
1. Méthode.....	122
2. Résultats	124
3. Discussion.....	129
III.Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et perturbation des informations proprioceptives.....	133
III.1 Vibrations tendineuses localisées	135
1. Vibration : Définition	135
2. Perturbation proprioceptive par vibrations	135
III.2 Problématique.....	136
III.3 Etude 3: Effets de l'application de vibrations tendineuses lors de la réalisation du paradigme de Nassauer & Halperin (2003)	138
1. Méthode.....	138
2. Résultats	140
3. Discussion.....	146
IV. Première phase expérimentale : discussion générale et conclusion	152
<i>Seconde phase expérimentale.....</i>	<i>157</i>

I. Interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours de l'âge	159
I.1. Rappel des enjeux et objectifs	159
I.2. Etude 4: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice chez le jeune adulte ?	161
1. Hypothèse	161
2. Méthode	161
3. Résultats	168
4. Discussion.....	173
I.3. Etude 5: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours du vieillissement ?	178
1. Hypothèse	178
2. Méthode	178
3. Résultats	185
4. Discussion.....	196
I.4. Etude 6: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, motrice et fonction sensorimotrice chez le sujet âgé lors d'une tâche posturale statique? ..	206
1. Hypothèse	206
2. Méthode	206
3. Résultats	209
4. Discussion.....	212
 II. Seconde phase expérimentale : discussion générale et conclusion.....	216
1. Apports théoriques et expérimentaux	216
2. Perspectives STEP'INH	220
3. Vieillesse, inhibition perceptive et inhibition motrice : perspectives.....	221

<i>Annexes</i>	225
-----------------------------	------------

<i>Bibliographie</i>	225
-----------------------------------	------------

Introduction

Vieillir est un phénomène progressif et inéluctable propre à chaque individu. Bien que l'espérance de vie augmente depuis plusieurs décennies, cette dernière amène un certain nombre de problématiques majeures, notamment en ce qui concerne la prise en charge médicale, sociale et économique de la personne âgée. Ainsi, mieux comprendre les effets du vieillissement et les conséquences de leurs interactions sur l'individu dans son ensemble constitue une des plus importantes préoccupations contemporaines.

Même s'il est désormais reconnu que le vieillissement s'accompagne d'une dégradation des processus cognitifs et sensorimoteurs, l'influence mutuelle de leur dégradation sur l'autonomie reste encore à caractériser. L'autonomie, garante de la capacité à se gouverner soi-même, nécessite d'un point de vue fonctionnel que l'individu s'adapte à un environnement en constante évolution. Cette adaptation est dépendante à la fois de la disponibilité et la qualité des informations perçues par les différents récepteurs sensoriels de l'organisme, de leur intégration et de leur traitement au niveau du système nerveux central ainsi que de l'élaboration et de l'exécution d'une réponse motrice adaptée. Autrement dit, l'autonomie fonctionnelle repose sur l'articulation efficiente de processus cognitifs, moteurs et sensoriels. Parmi ces processus, l'inhibition s'est vue attribuée un rôle central dans la dimension cognitive du vieillissement (Hasher & Zacks, 1988).

Etant donné la polysémie du terme *inhibition*, il semble important de préciser que, dans le cadre de cette thèse, son utilisation renvoie exclusivement au processus cognitif permettant la suppression des informations et/ou des réponses inadaptées afin de garantir la focalisation attentionnelle nécessaire à la réalisation d'une action dirigée vers un but. En accord avec la conception plurielle de l'inhibition, telle que sous-tendue par des processus inhibiteurs spécialisés et distincts, Nassauer & Halperin (2003) soutiennent l'existence de deux processus spécifiques.

Une inhibition dite *perceptive* (IP), serait responsable de la suppression des caractéristiques non-pertinentes d'un stimulus, tandis qu'une inhibition dite *motrice* (IM) permettrait d'empêcher la sélection de réponses prédominantes mais inappropriées à la tâche en cours. Ces auteurs ont ainsi conçu un paradigme expérimental, composé de différentes tâches de temps de réaction (TR), permettant d'évaluer individuellement et simultanément ces processus. Néanmoins, l'influence sur leurs résultats des potentiels biais méthodologiques que représentent la différente quantité d'information à traiter dans les tâches de TR et leur ordre de passation fixe a été avancée dans la littérature (Jennings et al., 2011 ; Sparto et al., 2013), sans pour autant être évaluée ou démontrée.

Ainsi, une première phase expérimentale visera à tester la validité de ce paradigme au regard de ces potentiels biais méthodologiques. Le profil de résultats ayant conduit ces auteurs à soutenir une dissociation de l'IP et de l'IM chez le jeune adulte sera également mis à l'épreuve grâce à la manipulation de la complexité posturale, des effecteurs de réponses et du contexte proprioceptif présent lors de l'évaluation.

De nombreux travaux ont mis en évidence que le déclin de l'inhibition lié à l'âge impactait les comportements moteurs de la personne âgée. Une initiation du pas moins réactive (Uemura et al., 2016) et une difficulté à éviter les obstacles (Potocanac et al., 2015) ont par exemple été rapportées. Cette interaction entre inhibition et fonction motrice a été principalement étudiée par les tests de Stroop ou du Go/NoGo (Hausdorff et al., 2008 ; Plummer-D'Amato et al., 2011). Dans le cadre de cette distinction spécifique de l'IP et de l'IM, Redfern et al. (2009) ont évalué chez des sujets jeunes et âgés si un lien corrélationnel pouvait exister entre ces deux processus inhibiteurs spécifiques et le contrôle postural, notamment lorsque ce contrôle doit faire face à un contexte visuel ou proprioceptif perturbé. Ils ont ainsi mis en évidence chez la personne âgée une corrélation positive entre les capacités d'IP et la stabilité posturale mesurée en présence

d'une perturbation proprioceptive. Il a ainsi été suggéré que, contrairement à l'IM, le vieillissement confère un rôle spécifique à l'IP dans la gestion des perturbations proprioceptives nécessaire à une posture stable. Dès lors, une question s'impose : *Est-il possible de soutenir ce rôle spécifique de l'IP dans le contrôle sensorimoteur de la personne âgée, suggéré sur la seule base d'analyses corrélationnelles ?*

Une seconde phase expérimentale visera ainsi à étudier ce tryptique *inhibition-fonction motrice-proprioception* et sa potentielle évolution au cours de l'âge. Sur la base des éléments rapportés dans la littérature, l'hypothèse avancée est que l'inhibition perceptive participe spécifiquement à la régulation posturale de la personne âgée lorsque celle-ci doit faire face à un contexte proprioceptif perturbé.

Cadre théorique

I. Attention et fonctions exécutives : des processus cognitifs fondamentaux

I.1. L'attention

Définie pour la première fois par William James en 1890, l'attention est l'un des processus cognitifs fondamentaux et constitue un prérequis à l'ensemble des fonctions cognitives. L'attention permet « *la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles. La focalisation, la concentration et la conscience sont de son essence. Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres* » (James, 1890; pages 381-382).

Les nombreuses modélisations de l'attention illustrent la diversité des approches et des situations expérimentales au cours desquelles elle est observée (Kahneman, 1973; Schneider & Shiffrin, 1977; Van Zommeren & Brouwer, 1994). Certains auteurs ont abordé le fonctionnement attentionnel en lien avec le fonctionnement mnésique (Cowan, 1988). Baddeley (1986) a par exemple établi un modèle théorique de la mémoire de travail¹ dans lequel il intègre l'attention. Selon lui, il est difficile voire impossible d'isoler l'attention de la mémoire de travail, et avance ainsi la notion d'attention de travail (Bukiatme & Chausson, 2004). Son modèle décrit un administrateur central, responsable du fonctionnement de la mémoire de travail dans son ensemble et de la répartition des ressources attentionnelles. Véritable système de contrôle attentionnel, cet administrateur permettrait ainsi l'intégration des informations pertinentes et la sélection des stratégies adaptées.

¹ La *mémoire de travail* est un système de capacités limitées, responsable à la fois du stockage et de la manipulation simultanée d'informations durant la réalisation de tâches cognitives (Baddeley, 1986).

D'autres auteurs ont identifié trois composantes attentionnelles principales (Berger & Posner, 2000; Posner & Petersen, 1990). Bien que ces composantes interagissent, chacune est sous-tendue par un réseau neuronal spécifique (Posner & Rothbart, 1992). La composante d'*alerte* est une modulation de l'état d'éveil, de réactivité ou de vigilance, signalant *quand* il convient de faire attention. La composante d'*orientation* détermine à *quoi* prêter attention. L'orientation exogène correspond à la capture involontaire de l'attention par la prédominance d'un stimulus extérieur, pertinent ou non pour la tâche. L'orientation endogène renvoie à l'investissement d'une attention délibérément contrôlée, focalisée et maintenue, permettant une résistance à la distraction (Kastner & Ungerleider, 2000). Enfin, la composante dite *exécutive* ou *contrôlée* de l'attention détermine *comment* organiser de manière efficace son orientation et le partage des ressources attentionnelles disponibles². Intervenant dans la gestion des conflits et la détection d'erreur, l'objectif est de favoriser le traitement de l'information pertinente et l'inhibition des stimuli non-pertinents pour la tâche en cours.

La finalité étant d'assurer l'adaptabilité, un chevauchement apparaît entre les conceptions de l'attention et des processus sur lesquels elle s'applique. Son fonctionnement est ainsi indissociable de celui de la mémoire mais également de celui des fonctions exécutives (Luck & Gold, 2008).

I.2. Les fonctions exécutives

Le contrôle exécutif constitue l'un des aspects les plus complexes de la cognition humaine. Malgré les nombreux travaux traitant de ce contrôle (ex. Diamond, 2011, 2013; Falck et al., 2017; Ishihara et al., 2017; Jewsbury et al., 2016; Koziol et al., 2012), la nature et la définition de ce dernier font l'objet de débats au sein de la communauté scientifique. Depuis les

² La quantité de ressources assignée à l'effort attentionnel est limitée (Kahneman, 1973).

années 1960, de nombreuses définitions du contrôle exécutif ont été proposées, chacune soutenue par différentes théories influentes catégorisées selon deux conceptions principales. La première concerne les théories qui envisagent le contrôle exécutif comme un système unitaire, assuré par exemple via un système attentionnel superviseur qui permet le contrôle conscient et délibéré des conflits ne pouvant être résolus par des solutions automatiques (Norman & Shallice, 1980). La seconde conception rassemble les théories qui suggèrent un contrôle exécutif sous-tendu par de multiples composantes exécutives. Initiée par les travaux de Luria (1966) chez des patients présentant des lésions du cortex frontal, cette seconde conception domine très largement aujourd'hui l'étude du contrôle exécutif (Luria, 1966, 1973; Miyake et al., 2000; Rabbit, 1997; Shallice, 1982).

L'appellation « fonctions exécutives » apparaît pour la première fois sous la plume de Lezak (1982). Ces fonctions sont couramment définies comme un ensemble de processus cognitifs de haut niveau qui permet la réalisation d'actions nouvelles, non-routinières, pour lesquelles il n'y a pas de solution automatique (Rabbit, 1997; Shallice, 1988). En d'autres termes, les fonctions exécutives sont particulièrement sollicitées lors de situations nécessitant une planification ou/et une organisation des actions afin d'atteindre un objectif précis. Leur rôle est donc crucial puisqu'il permet, au sein d'un environnement complexe en constante évolution, l'élaboration, l'exécution et le contrôle efficient de comportements finalisés. Par exemple, de nombreux travaux ont démontré l'importance des fonctions exécutives pour le contrôle des comportements moteurs, tels que l'équilibre orthostatique et la marche, aussi bien chez l'enfant (Jackson et al., 2016; Reilly et al., 2008), que chez le jeune adulte (Decker et al., 2013; Yogev-Seligmann et al., 2008) et l'adulte âgé (Beauchet et al., 2012; Hausdorff et al., 2005; Watson et al., 2010).

Les théories soutenant l'existence de différentes fonctions exécutives diffèrent en ce qui concerne le fractionnement de celles-ci (Fisk & Sharp, 2004; Huizinga et al., 2006; Miyake et al., 2000; Monette & Bigras, 2008). Toutefois, les composantes exécutives les plus couramment citées sont : la mise à jour de l'information en mémoire de travail, la flexibilité mentale et l'inhibition (Miyake et al., 2000).

→ ***Mise à jour en mémoire de travail***

Cette fonction renvoie à la capacité de manipuler activement l'information maintenue en mémoire de travail. Elle permet d'en contrôler le contenu afin de servir la tâche en cours en remplaçant les informations anciennement pertinentes par de nouvelles plus appropriées. Sollicitée par exemple lors des activités de calcul mental ou de planification, cette fonction est couramment évaluée à travers des tâches de mémorisation telles que la double tâche de Baddeley (1986)³.

→ ***Flexibilité mentale***

Cette composante exécutive reflète la capacité d'alterner dynamiquement entre différentes tâches ou différentes stratégies de réponse selon les besoins de la tâche. Le Trail Making Test (TMT), développé par l'armée américaine en 1944, est le test le plus couramment utilisé afin d'évaluer cette fonction.

→ ***Inhibition***

L'inhibition représente la capacité de suppression délibérée d'une réponse automatique, prédominante mais inadaptée dans le cadre de l'action en cours, ainsi que toutes les informations distractives et non-pertinentes pour la réalisation de cette action. De nombreuses tâches expérimentales ont été conçues dans le but de rendre compte de cette fonction, telles que le test de Stroop (Stroop, 1935) et la tâche de Flanker (Eriksen & Eriksen, 1974).

³ Cette tâche permet l'évaluation des capacités de coordination de deux tâches simultanées : une tâche d'empan de chiffre et une tâche manuelle.

Il est important de souligner que, même si ces trois composantes exécutives sont considérées comme distinctes, elles sont également interdépendantes (Miyake et al., 2000). Par exemple, la flexibilité mentale est étroitement liée à la mémoire de travail, et requiert l'inhibition de la stratégie qui n'est plus adaptée à la tâche afin d'en sélectionner une plus efficiente. Ces composantes sont donc à la fois dissociables car fortement associées à des tâches expérimentales qui les sollicitent spécifiquement et interdépendantes car corrélées les unes aux autres (Figure 1). Cette observation illustre la théorie de l'unité et de la diversité des composantes exécutives soutenue par Miyake et al. (2000).

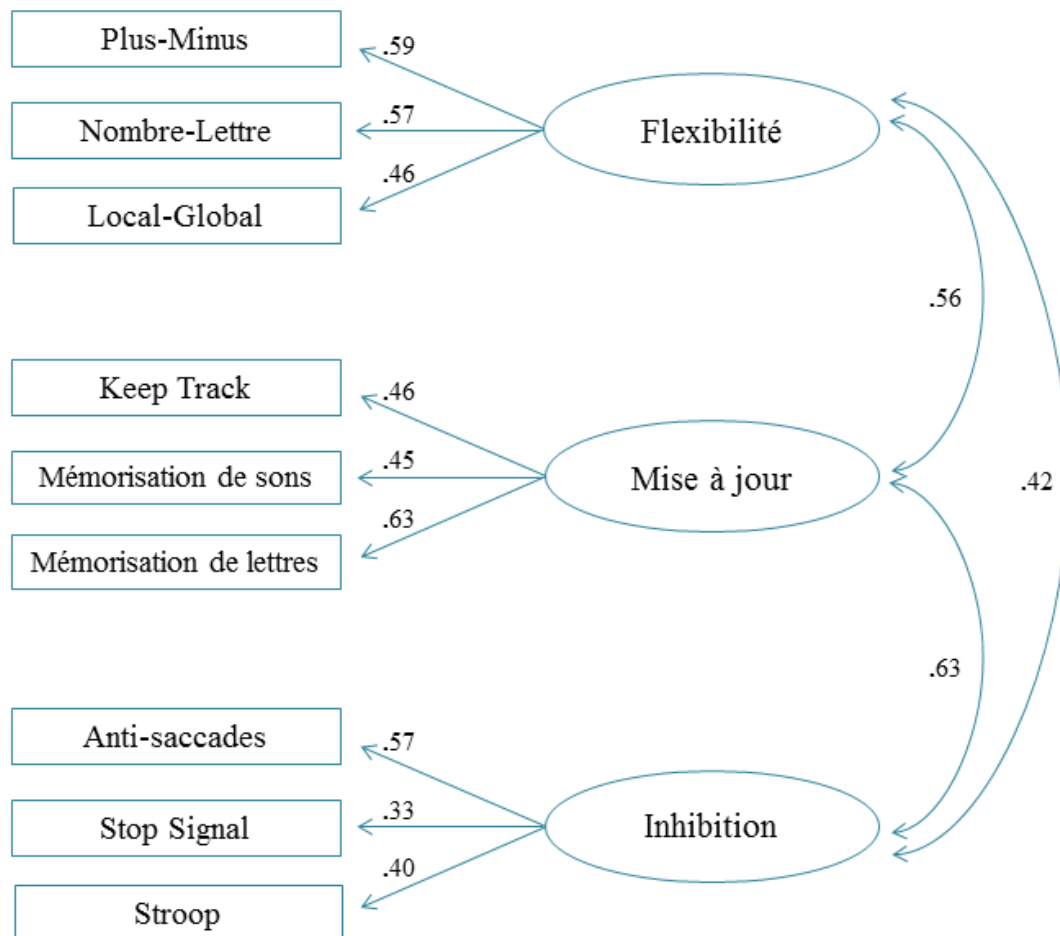


Figure 1. Illustration des corrélations entre les trois composantes exécutives modélisées par Miyake et al. (2000) et les tâches expérimentales correspondantes.

Souhaitant mettre cette théorie à l'épreuve de la neuroimagerie, Collette et al. (2005) ont localisé spécifiquement les activations cérébrales qui caractérisaient chacune de ces trois composantes exécutives. Les données neuro-anatomiques obtenues, grâce à la tomographie par émission de positrons, ont corroboré cette théorie d'unité et de diversité des composantes exécutives susmentionnées puisque chacune d'entre elles activent à la fois des aires cérébrales préfrontales spécifiques, tout en partageant l'activation de certaines aires, notamment postérieures (Collette et al., 2005).

Dans le cadre de cette thèse, le modèle proposé par Miyake et al. (2000) présente un intérêt central puisque, contrairement à d'autres (ex. Stuss & Alexander, 2007⁴), l'inhibition y est considérée comme une composante exécutive à part entière jouant un rôle central dans le contrôle cognitif.

⁴ D'après ces auteurs, bien que l'inhibition existe d'un point de vue neurochimique et neurobiologique, il n'est pas possible de l'isoler d'un point de vue cognitif, puisque tout choix suppose l'inhibition des solutions inadaptées.

Chapitre I. En quelques mots

- *L'attention, très liée aux fonctions mnésiques et exécutives, favorise le traitement de l'information cible.*
- *Les fonctions exécutives supervisent la réalisation des actions nouvelles, non-routinières, pour lesquelles il n'y a pas de solutions automatiques.*
- *La mise à jour, la flexibilité mentale et l'inhibition sont couramment considérées comme les principales fonctions exécutives.*
- *La théorie de l'unité et de la diversité des composantes exécutives est considérée comme une référence dans le domaine.*

Et maintenant : A quoi correspond la fonction d'inhibition ?

II. L'inhibition

II.1. Définition

Provenant du terme latin *inhibire* signifiant littéralement « *arrêter un bateau en ramant en arrière* » (Boujon & Lemoine, 2002), l'inhibition est définie comme « *l'ensemble des processus qui permettent la suppression de contenus cognitifs précédemment activés, le déblaiement de la conscience des actions et des focalisations attentionnelles inadéquates, et la résistance à l'interférence en provenance de stimuli potentiellement capteurs d'attention* » (Bjorklund & Harnishfeger, 1995).

De nombreux travaux relatifs à cette fonction d'inhibition s'accordent à la décrire comme un **processus actif de suppression** (Posner & Snyder, 1975; Tipper, 1985). En effet, la sélection de l'information ou de l'action adaptée est dépendante de l'inhibition de celles qui ne le sont pas (Driver & Tipper, 1989). Il est également souligné que cette fonction est dépendante du contexte dans lequel elle est générée, des différentes stratégies utilisées et du but fixé par l'individu (Boujon & Lemoine, 2002). Ainsi, l'inhibition est modélisée comme un processus flexible capable de s'adapter en fonction des attentes perçues et des variations du contexte (May et al., 1995).

Selon Dempster (1991, 1992), l'inhibition garantit une focalisation sélective de l'attention afin de résister aux phénomènes d'interférence qui affectent le fonctionnement cognitif. Ces phénomènes d'interférence, définis comme la conséquence d'une activation automatique de représentations non pertinentes pour la tâche, sont liés aux propriétés du contexte. Cet auteur en distingue différentes formes, modélisées à partir de la source [i.e., interférence interne (connaissances du sujet) vs. externe (environnement perceptif)] et de la dimension temporelle d'acquisition [i.e., interférence pro-, retro-, coactive] des représentations non pertinentes pour la

tâche considérée (Dempster, 1995). Suite à cette distinction des phénomènes d'interférence, Dempster soulève la question de la nature précise des processus qui en permettent la résolution. Plus précisément, il s'interroge sur l'existence de multiples processus d'inhibition qui permettraient la prise en charge de chacune des formes d'interférence susnommées : « *J'imagine qu'il existe une famille de processus inhibiteurs, chacun spécialisé pour traiter des demandes quelque peu différentes* » (Dempster, 1991, page 108).

La diversité des tâches expérimentales visant à sonder la fonction d'inhibition a également soulevé de manière récurrente la question de l'unité de cette fonction. En effet, les tâches permettant d'évaluer l'inhibition sont nombreuses, chacune mettant en jeu une configuration expérimentale spécifique. Parmi les plus couramment utilisées, on retrouve le test de Stroop (Stroop, 1935), le test du Go/NoGo (Donders, 1869), la tâche de Flanker (Eriksen & Eriksen, 1974) ou encore celle du Stop-signal (Logan & Cowan, 1984). De nombreux travaux ont cherché à comprendre si les performances récoltées au cours de ces différentes tâches étaient la conséquence d'un seul et unique processus inhibiteur ou si une multitude de processus, chacun intervenant dans une configuration spécifique, partageaient cette propriété active de suppression.

Face à cette interrogation, plusieurs modèles visant à caractériser plus finement le fonctionnement inhibiteur ont été proposés.

II.2. Différentes approches du fonctionnement inhibiteur

Parmi les modèles les plus couramment cités, celui proposé par Harnishfeger (1995) décrit un fonctionnement inhibiteur fractionné selon trois axes : intentionnel *vs.* non-intentionnel, comportemental *vs.* cognitif, inhibition *vs.* interférence. Précisément, le premier axe distingue une inhibition contrôlée et consciente d'une inhibition automatique. Le deuxième axe différencie

l'inhibition comportementale de l'inhibition cognitive, reflétant la suppression respectivement d'une réponse motrice automatique et d'informations non-pertinentes. Enfin, le troisième axe distingue un contrôle inhibiteur actif d'un contrôle passif agissant en dehors du champs de la conscience, notamment lors des configurations présentant de multiples distractions (Lener et al., 2015).

Sur la base de ce modèle (Harnishfeger, 1995), Joël Nigg a proposé une modélisation basée sur la dissociation des processus inhibiteurs contrôlés et coûteux en ressources attentionnelles⁵ [i.e., « *effortfull* », par exemple : l'inhibition comportementale, cognitive et oculomotrice] d'une part, de processus inhibiteurs plus automatiques [ex. l'inhibition de retour⁶, l'inhibition de localisations spatiales non pertinentes] d'autre part (Nigg, 2000).

Au-delà des spécificités théoriques propres à chacun de ces modèles, ces derniers illustrent la diversité des approches du fonctionnement de la fonction d'inhibition. Dans le cadre de ce travail, l'objectif n'est pas d'établir une liste exhaustive des modèles existants, mais de détailler la conception des processus inhibiteurs qui ont été spécifiquement étudiés dans cette thèse, à savoir l'inhibition dite *perceptive* et l'inhibition dite *motrice*. Aussi, le modèle de Hasher et al. (1999) est plus spécifiquement présenté ci-après afin d'introduire les notions centrales de ce travail de thèse.

⁵ Les *ressources attentionnelles* allouées à un processus cognitif [ex. inhibition] constituent la participation énergétique nécessaire à son expression. Les processus cognitifs dits contrôlés sont dépendants des ressources attentionnelles disponibles tandis que les processus dits automatiques ne le sont pas (Schneider & Shiffrin, 1977). Plus un processus cognitif est contrôlé, plus le coût attentionnel [i.e., la quantité de ressources attentionnelles allouées à ce processus] est important.

⁶ L'*inhibition de retour* illustre la réduction de la tendance à réorienter le regard dans une direction antérieurement explorée (Posner & Cohen, 1984).

1. Le modèle de Hasher, Zacks et May (1999)

Ce modèle postule que le fonctionnement inhibiteur est spécifiquement lié aux capacités de la mémoire de travail. En effet, ces auteurs suggèrent une articulation du fonctionnement inhibiteur selon trois fonctions d'inhibition distinctes assurant le contrôle du contenu de la mémoire de travail (Hasher et al., 1999). Ces fonctions sont décrites comme opérant à des étapes différentes du traitement de l'information⁷ et sont nommées fonction de filtrage (*accessing function*), fonction de suppression (*deleting function*) et fonction de restriction (*restraining function*).

→ *Inhibition de filtrage*

Ce processus de filtrage aurait pour rôle de déterminer quelles représentations peuvent être encodées en mémoire de travail afin de servir la réalisation de l'objectif visé. Les éléments non-pertinents ainsi que les représentations activées automatiquement par la présence de stimuli familiers sont filtrés avant même d'atteindre le champ de la conscience. Un dysfonctionnement de ce processus de filtrage engendrerait des conflits lors de la récupération des éléments (pertinents vs. non pertinents) pour la tâche en cours.

→ *Inhibition de suppression*⁸

Ce processus de suppression aurait pour rôle de supprimer les représentations activées en mémoire de travail qui ne sont plus utiles à l'objectif visé. La suppression des informations devenues non-pertinentes est considérée comme centrale pour assurer l'efficacité de la mise à jour des

⁷ Cette thèse s'appuie sur les modèles sériels du traitement de l'information, suggérant que ce dernier est le résultat de la succession sérielle, c'est-à-dire sans recouvrement temporel, de trois stades principaux de traitement, à savoir : un stade **1/ perceptif**, responsable de l'**identification** des caractéristiques du stimulus, **2/ décisionnel**, permettant la **sélection** la réponse adaptée au stimulus présenté et **3/ moteur**, chargé de la **programmation** de la réponse sélectionnée (Sanders, 1983; Sternberg, 1969; Theios, 1975).

⁸ Egalement traduit par *fonction d'effacement* dans certains travaux francophones (Demanet et al., 2015; Feyereisen & Hupet, 2015).

représentations contenues en mémoire de travail (Bjork, 1989). Son dysfonctionnement favoriserait la présence en mémoire de travail d'informations anciennement utiles, engendrant ainsi des phénomènes d'interférence.

→ ***Inhibition de restriction***

Ce processus de restriction opèrerait face à la nécessité d'empêcher le déclenchement d'une réponse habituelle et fortement prédominante en mémoire de travail, lorsque celle-ci n'est pas adaptée à la tâche ou lorsqu'une réponse alternative, moins dominante, doit nécessairement être produite (May & Hasher, 1998). Un dysfonctionnement de ce processus favoriserait la production de réponses inadaptées.

Le modèle de Hasher et al. (1999) amène à penser que le fonctionnement inhibiteur s'exprime sur un versant perceptif (inhibitions de filtrage et de suppression) afin de contrôler le contenu représentationnel de la mémoire de travail, ainsi que sur un versant décisionnel (inhibition de restriction) en supprimant l'omnipotence de certains schémas de réponses automatiques inappropriés à la situation. Ce modèle n'est pas le seul à suggérer l'existence de processus inhibiteurs intervenant au stade *perceptif* ou *décisionnel* de la chaîne de traitement de l'information.

2. Vers une conception de l'inhibition perceptive et motrice

2.a) Apports des travaux sur l'effet Stroop

La tâche d'interférence du test de Stroop (1935) est couramment administrée afin d'évaluer les capacités d'inhibition. Expérimentalement, elle mesure la capacité de résolution d'une interférence créée par deux dimensions d'un même stimulus ; l'une à traiter car pertinente pour la tâche, l'autre à ignorer malgré son automatisation. Plus précisément, la tâche consiste à

dénommer la couleur d'encre (dimension pertinente) avec laquelle est écrit un nom de couleur (dimension non pertinente).

Dans une telle configuration, les deux dimensions du stimulus génèrent un conflit : le processus automatique de lecture du mot interfère avec le processus d'identification et de dénomination de sa couleur : c'est l'*effet Stroop*. La résolution de ce dernier nécessite l'inhibition du processus automatique de lecture.

Depuis la conception de cette tâche, de nombreux travaux ont cherché à caractériser plus finement cet effet Stroop, aujourd'hui considéré comme robuste et universel (Mitrushina et al., 2005). Initialement, il était suggéré que cet effet était la conséquence d'un ralentissement du traitement de l'information engendré par la présence des deux dimensions concurrentes (nom + couleur) du stimulus (Stroop, 1935). Néanmoins, des travaux plus récents amènent à penser que cet effet Stroop va au-delà d'une simple différence de vitesse de traitement. En effet, de nombreuses études, soutenues notamment par des données cliniques, s'accordent sur le fait qu'il serait le témoin de l'articulation de différents processus complexes (Awh & Gehring, 1999; Glaser & Glaser, 1982; MacLeod, 1991; O'Leary & Barber, 1993; Peterson et al., 1999; Stirling, 1979; Zhang et al., 1999). Plus spécifiquement, le contrôle inhibiteur nécessaire à la résolution de cet effet Stroop interviendrait au cours de deux différentes étapes conflictuelles du traitement du stimulus présenté (Brown & Besner, 2001; Roelofs, 2003; Zhang et al., 1999). Une première étape dite *perceptive* impliquant la sélection et l'encodage du stimulus, nécessiterait une inhibition des caractéristiques non-pertinentes de ce dernier. En d'autres termes, un contrôle inhibiteur interviendrait spécifiquement face au conflit généré par les caractéristiques du stimulus présenté (Glaser & Glaser, 1982). Par la suite, une seconde étape dite *décisionnelle*, impliquant la sélection d'une réponse adaptée, nécessiterait l'inhibition des réponses qui ne le sont pas.

Afin d'illustrer expérimentalement ces deux niveaux de contrôle, van Veen et Carter (2005) ont conçu une tâche de Stroop modifiée. Quatorze jeunes adultes (21.4 ± 2.2 ans) devaient répondre le plus rapidement possible en appuyant sur un bouton presseur tenu dans la main gauche lorsque la couleur du mot présenté était *rouge* ou *jaune* et sur celui tenu dans la main droite lorsque la couleur était *verte* ou *bleue*. Ils ont ainsi testé trois types de stimuli : les stimuli sémantiquement compatibles (SSC) [ex. **JAUNE** : réponse à gauche], les stimuli sémantiquement incompatibles (SSI) lors desquels le mot et la couleur faisaient référence à la même réponse motrice [ex. **JAUNE** : réponse à gauche] et les stimuli incompatibles au niveau sémantique et au niveau de la réponse (SISR) [ex. **JAUNE** : réponse à droite]. Leurs résultats ont rapporté que l'effet Stroop était présent lors des stimuli SSI par rapport aux SSC (conflit perceptif), et qu'il était d'autant plus important lors des stimuli SISR⁹ (conflit perceptif et conflit de réponse). Ce résultat souligne ainsi que l'effet Stroop s'exprime tant au niveau de la perception du stimulus présenté qu'au niveau de la sélection de la réponse à fournir (van Veen & Carter, 2005).

Une telle conception de l'effet Stroop suggère qu'il y aurait au moins deux conflits différents au cours desquels un contrôle inhibiteur serait nécessaire. Néanmoins, étant donné que la tâche originale d'interférence implique une résolution imbriquée de ce conflit *perceptif* et *moteur*¹⁰, elle apparaît peu indiquée pour l'étude isolée des processus inhibiteurs spécifiques sous-jacents à leurs résolutions (Nassauer & Halperin, 2003).

⁹ Les temps de réaction moyens étaient de 598 ± 146 ms lors des stimuli SSC, 643 ± 164 ms lors des stimuli SSI et de 719 ± 203 ms lors des stimuli SISR (chaque $p < 0.001$).

¹⁰ ▲ Dans le cadre de cette thèse, un **conflit dit moteur** est engendré par l'incompatibilité entre le stimulus présenté et la réponse à fournir. Il renvoie donc à la sélection de la réponse appropriée, une sélection réalisée au stade *décisionnel* du traitement de l'information (Sanders, 1983). ▲

2.b) Apports du modèle de Dempster et Corkill (1999) et des modèles associés

Considérant le contrôle inhibiteur comme étant l'unité de base du fonctionnement exécutif, Dempster et Corkill (1999) conçoivent l'inhibition comme une fonction opérant au sein de différents stades du traitement de l'information. Ainsi, ils proposent de distinguer une inhibition perceptive, motrice et verbale, toutes trois considérées comme des processus contrôlés coûteux en ressources attentionnelles (Dempster & Corkill, 1999). Bien que ce modèle puisse paraître opposé à ceux proposés par Harnishfeger (1995) et Nigg (2000), il prône en réalité une description du fonctionnement inhibiteur assez similaire. En effet, l'inhibition motrice soutenue par Dempster et Corkill (1999) est semblable à la notion d'inhibition comportementale relative à la suppression des réponses prédominantes et automatiques (Harnishfeger, 1995; Nigg, 2000). La notion d'inhibition perceptive s'accorde avec les notions d'inhibition cognitive proposées par Nigg (2000) et Harnishfeger (1995), relatives à la suppression des informations non pertinentes.

En résumé, ces différents modèles et les résultats expérimentaux associés supportent la conception de processus inhibiteurs distincts pouvant intervenir face à un conflit *perceptif* engendré par le stimulus et face à un conflit *moteur* engendré par la sélection de la réponse à fournir (Seymour, 1977; van Veen & Carter, 2005). Pour autant, les tâches expérimentales proposées jusqu'alors ne permettent pas d'évaluer ni de manipuler distinctement ces processus.

Dans ce contexte, Nassauer & Halperin (2003) ont développé un paradigme expérimental spécifique évaluant les processus inhibiteurs nécessaires à la résolution de conflits perceptif ou moteur.

3. L'inhibition perceptive et motrice mesurées par Nassauer & Halperin (2003)

Afin d'introduire leurs résultats et les interprétations associées, une rapide présentation de la méthode des facteurs additifs de Sternberg (1969) est nécessaire.

3.a) La méthode des facteurs additifs

En 1969, Saul Sternberg propose une méthode dite des « facteurs additifs » visant à déterminer le site d'influence d'une variable computationnelle ou énergétique dans la chaîne du traitement de l'information. L'articulation expérimentale qu'il propose consiste à faire varier, de façon indépendante, différentes variables d'une tâche de temps de réaction (TR) afin d'étudier leur impact spécifique sur le temps de réponse du sujet. Si le traitement du stimulus présenté est sériel, alors les effets cumulés des ralentissements observés sur le temps de réponse seront additifs. Autrement dit, ces effets s'additionneront. A contrario, si son traitement est parallèle, alors un effet d'interaction sera observé, reflétant ainsi plus qu'un simple allongement additif du temps de réponse (Sergeant, 1996; Sternberg, 1969).

Par exemple, l'étude menée par Azorin et al. (1995) manipulait deux variables d'une tâche de TR de choix : l'intensité lumineuse du stimulus visuel administré (forte vs. faible) et la compatibilité stimulus-réponse (congruente vs. non-congruente). Il est reconnu que l'intensité du stimulus affecte le stade perceptif du traitement de l'information tandis que la compatibilité stimulus-réponse affecte le stade décisionnel, relatif à la sélection de la réponse (Sanders, 1983, 1990). Les résultats obtenus ont révélé un effet du facteur « intensité du stimulus » ($p < 0.01$, TR lumière faible : 425 ms < TR lumière intense : 468 ms, +10%) ainsi qu'un effet du facteur « compatibilité » sur les performances ($p < 0.001$, TR congruent : 381 ms < TR non-congruent : 509 ms, +33%) (Azorin et al., 1995). L'interaction entre ces facteurs n'était pas significative, illustrant un effet additif¹¹ sur le TR de ces deux facteurs de complexité (Azorin et al., 1995). Un

¹¹ Plus précisément, le TR en configuration contrôle [i.e., compatible, forte intensité lumineuse] : **270** ms, TR compatible/faible : **325** ms, TR incompatible/forte : **350** ms, TR incompatible/faible : **410** ms. Le coût attentionnel associé à la faible intensité du stimulus est de 55 ms (325 – 270 ms), celui associé à l'incompatibilité stimulus-réponse est de 80 ms (350 – 270 ms) tandis que le coût associé à la combinaison de ces deux types de conflits est de 140 ms (410 – 270 ms). Ces résultats illustrent ainsi un **effet additif** (80 + 55 = 135 ms vs. 140 ms).

tel profil de résultats soutient que la résolution du conflit engendré par chacune de ces variables intervenait à un niveau de traitement différent [i.e., intensité du stimulus : stade perceptif vs. compatibilité: stade décisionnel]. De plus, certains auteurs postulent que cet effet additif refléterait la mobilisation de ressources cognitives distinctes (Nassauer & Halperin, 2003).

Sur la base de cette méthode, Nassauer & Halperin (2003) ont mis à l'épreuve l'hypothèse suivante : « *si l'inhibition des informations non-pertinentes et l'inhibition des réponses inappropriées sollicitent des ressources cognitives distinctes, alors l'expression simultanée de ces deux processus inhibiteurs engendrerait uniquement un allongement additif des temps de réponse* » (Nassauer & Halperin, 2003, page 26).

3.b) Définition des deux formes d'inhibition évaluées

Nassauer & Halperin (2003) ont souhaité évaluer séparément les processus inhibiteurs supposés distincts nécessaires à la résolution d'un conflit perceptif ou moteur. Plus précisément, leur objectif était de rendre compte :

- d'une inhibition dite *perceptive* (**IP**), reflétant la capacité à inhiber les caractéristiques non-pertinentes d'un stimulus visuel présenté [conflit perceptif].
- d'une inhibition dite *motrice* (**IM**), relative à la capacité à inhiber la **sélection** d'une réponse motrice évidente mais inappropriée à la tâche en cours [conflit moteur].

3.c) Le paradigme expérimental

Différentes tâches expérimentales de TR ont été proposées afin d'évaluer l'IP ou l'IM, grâce à la manipulation de conflits perceptif ou moteur. Les stimuli visuels manipulés étaient des flèches, dont le sens et la localisation étaient à l'origine des conflits. A l'apparition d'une flèche à l'écran, le sujet devait répondre le plus rapidement possible en appuyant sur une touche réponse avec la main droite ou la main gauche. L'association de ces stimuli à des consignes

spécifiques engendrait deux types de réponses : congruente *vs.* non-congruente (Figure 2). Les réponses congruentes étaient en accord avec le sens indiqué par la flèche [ex. si la flèche est dirigée vers la droite, alors répondre avec la main droite], tandis que les réponses non-congruentes nécessitaient la résolution d'un conflit via l'intervention d'un processus inhibiteur.

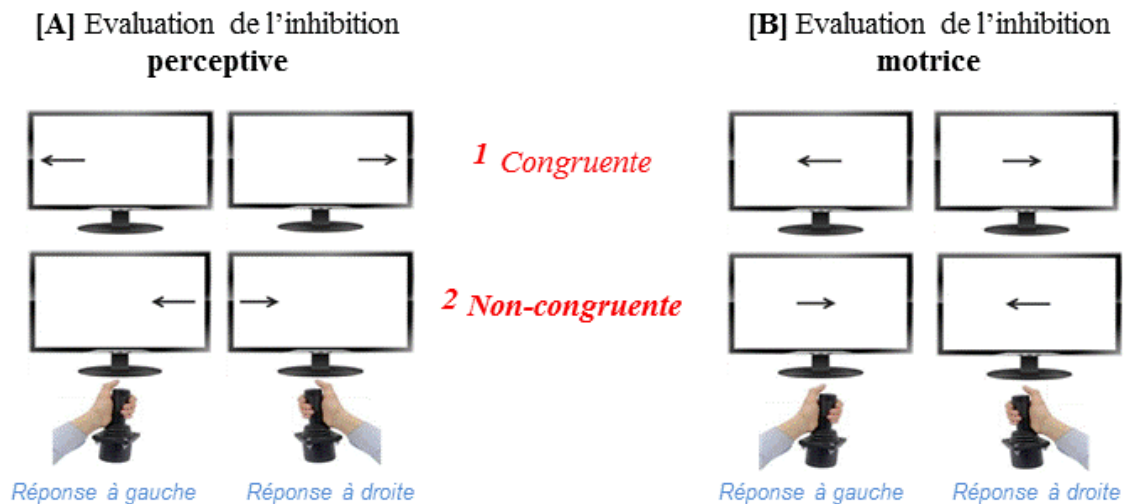


Figure 2. Illustration des tâches expérimentales proposées par Nassauer & Halperin (2003) pour évaluer séparément [A] l'inhibition perceptive et [B] l'inhibition motrice.

*Note. L'inhibition est évaluée uniquement dans les configurations non-congruentes (2) face auxquelles le sujet doit résoudre un conflit [A] **perceptif** (i.e., incompatibilité entre la localisation de la flèche et le sens qu'elle indique) ou [B] **motrice** (i.e., incompatibilité entre la réponse attendue et le sens indiqué par la flèche).*

Plus spécifiquement, en configuration d'**IP**¹², le lieu d'apparition de la flèche est en contradiction avec le sens indiqué (Figure 2-A²). L'inhibition porte donc sur le conflit généré par l'incompatibilité sens / localisation de la flèche [ex. la flèche apparaît à *gauche* de l'écran dirigée vers la *droite*, le sujet doit répondre en appuyant sur le bouton de *droite*]. En configuration d'**IM**,

¹² Cette configuration d'IP est inspirée de la **tâche de Simon** (Craft & Simon, 1970; Simon, 1969). Cette tâche implique généralement un stimulus spécifique (ex. un cercle) apparaissant à droite ou à gauche de l'écran. Ce stimulus peut être de deux différentes couleurs (ex. jaune *vs.* rouge). La consigne est de répondre systématiquement selon la couleur du stimulus, quel que soit sa localisation (ex. si le cercle est jaune, alors le sujet répond avec la main *droite*). Dès lors, si un cercle jaune apparaît à gauche de l'écran, le sujet doit inhiber sa localisation et répondre avec la main *droite*.

la réponse du sujet est en contradiction avec le sens de la flèche présentée (Figure 2-B²). L'inhibition porte donc sur le conflit généré par l'incompatibilité stimulus / réponse [ex. la flèche est dirigée vers la *droite*, le sujet doit répondre en appuyant sur le bouton de *gauche*].

Par ailleurs, il est utile de souligner qu'en configuration d'IM, les réponses congruentes (Figure 2-B¹) sont considérées comme neutres. En effet, étant donné que le stimulus apparaît systématiquement au centre de l'écran et que la réponse attendue est en accord avec le sens indiqué, aucune résolution de conflit n'est nécessaire. A contrario, en configuration d'IP, les réponses congruentes (Figure 2-A¹) présentent une incertitude spatiale quant à la localisation de la flèche [i.e., apparition à droite vs. gauche].

3.d) Distinction de l'inhibition perceptive et motrice

En plus des tâches expérimentales évaluant séparément l'IP et l'IM (Figure 2), Nassauer & Halperin (2003) ont conçu une tâche, notée ici IP&IM, combinant le conflit perceptif et le conflit moteur afin d'évaluer simultanément ces deux processus inhibiteurs. Pour ce faire, les caractéristiques des stimuli présentés étaient identiques à celles de la tâche d'IP [i.e., la flèche apparaît à droite ou à gauche de l'écran – incertitude spatiale] et le sujet devait systématiquement répondre à l'inverse du sens indiqué par la flèche (IM) (Figure 3). L'évaluation simultanée de l'IP et de l'IM se faisait donc uniquement lors des essais présentant un conflit perceptif, c'est-à-dire une contradiction entre la localisation de la flèche et son lieu d'apparition (Figure 3²).

Cette tâche est d'une importance capitale dans la logique théorique et expérimentale de ces auteurs. En effet, conformément aux postulats de la méthode des facteurs additifs, c'est cette tâche qui leur a permis de conclure à une dissociation des processus d'IP et d'IM chez le jeune adulte. Plus précisément, le profil de résultats obtenus suite à l'évaluation de 44 sujets (23.3 ± 5.9 ans) a mis en évidence un allongement du TR en présence du conflit perceptif manipulé ($p <$

0.001, TR **absence** de conflit perceptif : 422.5 ± 74.8 ms vs. TR **présence** de conflit perceptif : 593 ± 151.2 ms, +40%) et du conflit moteur ($p < 0.001$, TR **absence** de conflit moteur : 450.5 ± 72.5 ms vs. TR **présence** de conflit moteur : 565 ± 161.2 ms, +25%) [cf. Annexe 1 pour le détail du calcul « TR absence de conflit vs. TR présence de conflit », page 226]. De plus, la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur n'a pas entraîné pas un effet d'interaction ($p > 0.5$), mais un effet additif¹³ sur les TR. Cet effet d'additivité soutient l'idée que les processus d'IP et d'IM interviendraient à différents stades du traitement de l'information (Sternberg, 1969). Sur cette base, ces auteurs ont donc suggéré que l'IP et l'IM étaient deux processus inhibiteurs distincts, mobilisant différentes ressources cognitives.

Evaluation de simultanée de l'inhibition perceptive et motrice

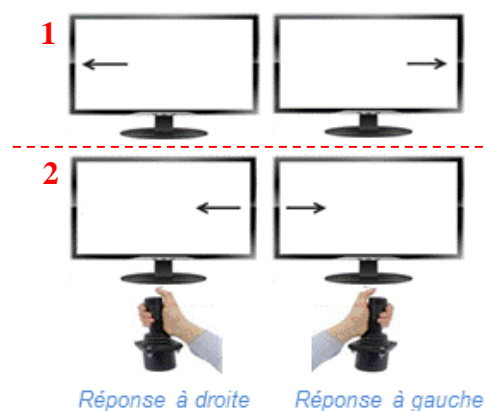


Figure 3. Illustration de la tâche expérimentale proposée par Nassauer & Halperin(2003) pour évaluer simultanément l'inhibition perceptive et l'inhibition motrice.

Note. La consigne est de systématiquement presser le bouton tenu dans la main opposée au sens indiqué par la flèche. Le conflit moteur (IM) est donc présent quelle que soit la flèche présentée (1 et 2). Le conflit perceptif (IP) est présent uniquement lorsqu'une incompatibilité apparaît entre le sens et la localisation de la flèche (2). Lors des essais (1), le conflit moteur (IM) est associé à une incertitude spatiale.

¹³ Précisément, le TR en configuration neutre est égale à : **363** ms, TR IP : **538** ms, TR IM : **482** ms, TR IP&IM : **648** ms. Le coût associé au conflit perceptif est donc de 175 ms ($538 - 363$ ms), celui associé au conflit moteur est de 119 ms ($482 - 363$ ms), tandis que le coût associé à la combinaison de ces conflits est de 285 ms ($648 - 363$ ms).

Ces résultats illustrent ainsi un **effet additif** ($175 + 119 = 294$ ms vs. 285 ms).

Ainsi, Nassauer & Halperin défendent une conception multidimensionnelle de la fonction d'inhibition, cette dernière s'exprimant lors d'un conflit de nature perceptive (Figure 2-A²) ou motrice (Figure 2-B²). De plus, le paradigme proposé semble propice à une évaluation distincte et spécifique des performances d'IP et d'IM chez le jeune adulte (Nassauer & Halperin, 2003).

Depuis 2003, dix-huit études ont mobilisé ce paradigme expérimental dans le but de rendre compte des capacités inhibitrices en fonction de l'âge [i.e., données récoltées sur des sujets âgés de 4 à 76 ans en moyenne] et de diverses pathologies [ex. hyperactivité, troubles vestibulaires, atteintes cérébrales, maladies de Parkinson, Alzheimer] (Tableau 1). Ce travail de thèse étant consacré à l'effet du vieillissement¹⁴ sur les capacités d'inhibition, seules les études mobilisant ce paradigme auprès de sujets âgés seront abordées dans la suite de ce document.

¹⁴ Dans le cadre de cette thèse, seuls les effets du vieillissement dit « *normal* », c'est-à-dire en l'absence de toute pathologie, étaient étudiés.

Tableau 1. Etat des lieux des études mobilisant le paradigme proposé par Nassauer & Halperin (2003) pour l'évaluation des capacités inhibitrices (listées par date de publication croissante, partie 1/2)

Année	Auteurs	n	Age moyen	Evaluations cliniques	Configuration expérimentale
2003	Nassauer & Halperin	44	23.3 ans	-	ST
2005	Marks et al.	72	4.3 ans	A risque d'hyperactivité vs. Contrôles	ST
2005	Schultz et al.	16	10 ans	Patients hyperactifs vs. Contrôles	ST
2007	Schmiedt-Fehr et al.	11	33 ans	Contrôles	ST
		22	59.5 ans	Patients parkinsoniens vs. Contrôles	
2008	Germain & Collette	40	24.1 ans	-	ST
		35	66.7 ans		
2009	Redfern et al.	24	25.7 ans	-	ST*
		24	74.2 ans		
2010	Bedard et al.	174	18.4 ans	Patients hyperactifs vs. Contrôles	ST
2010	Mendelson et al.	24	25.8 ans	-	ST*
		22	74.3 ans		
2010	Mohammad et al.	22	52 ans	Troubles vestibulaires	ST
2011	Catale et al.	36	10.1 ans	Lésions cérébrales vs. Contrôles	ST
2011	Jennings et al.	47	24.8 ans	-	ST
		51	73.3 ans		

Tableau 1 (suite). Etat des lieux des études mobilisant le paradigme proposé par Nassauer & Halperin (2003) pour l'évaluation des capacités inhibitrices (listées par date de publication croissante, partie 2/2)

Année	Auteurs	<i>n</i>	Age moyen	Evaluations cliniques	Configuration expérimentale
2012	Stawarczyk et al. (Etude 1)	20	22.1 ans	-	ST
		20	64.9 ans		
2012	Stawarczyk et al. (Etude 2)	32	75.4 ans	Patients Alzheimer vs. Contrôles	ST
2013	Huppert et al.	10	34.2 ans	-	D!
2013	Sparto et al.	40	75 ans	-	D!
2014	Berwid et al.	183	4.3 ans	Patients hyperactifs vs. Contrôles	ST
2014	Sparto et al.	20	38 ans	-	D!
		70	76 ans		
2014	Sukits et al.	71	75.7 ans	-	ST*

Note. *n* : nombre de sujets; ST : Evaluation de l'IM et/ou de l'IP en **simple tâche** [i.e., le sujet est assis devant un écran, réponse attendue : pression sur la manette tenue dans la main *droite* ou sur celle tenue dans la *gauche* en fonction du stimulus et de la consigne]; **D!** : Evaluation de l'IM et/ou de l'IP dans une configuration **dynamique** [i.e., le sujet se tient debout, réponse attendue : initiation d'un pas vers la *droite* ou vers la *gauche* en fonction du stimulus et de la consigne associée].

* : Mise en relation des capacités d'IP et d'IM évaluées en simple tâche avec des variables posturales.

Chapitre II. En quelques mots

- *L'inhibition est un processus actif de suppression des informations et des réponses inadaptées.*
- *L'inhibition est conçue comme une fonction plurielle, caractérisée par de multiples processus inhibiteurs distincts en fonction du conflit à résoudre.*
 - *Il est possible de distinguer une inhibition **perceptive**, responsable de la suppression des informations non-pertinentes, et une inhibition **motrice**, chargée de la suppression des réponses prédominantes mais inadaptées à la tâche en cours.*
- *Nassauer & Halperin (2003) ont conçu un paradigme expérimental permettant d'évaluer séparément l'inhibition perceptive et l'inhibition motrice*
- *Telles qu'évaluées par le paradigme de Nassauer & Halperin (2003), il a été suggéré que l'inhibition perceptive et l'inhibition motrice nécessitent la mobilisation de ressources cognitives distinctes chez le jeune adulte.*

Et maintenant : Quels sont les effets du vieillissement sur les capacités d'inhibition ?

III. Effets de l'âge sur l'inhibition

Parmi les évolutions cognitives liées à l'avancée en âge [ex. moindre vitesse de traitement, capacité mnésique réduite (Dujardin & Lemaire, 2008 pour revue)], l'altération des fonctions exécutives apparaît centrale (Collette & Salmon, 2014; Salthouse et al., 2003; West, 2000) et constitue une des origines principales du vieillissement cognitif général (Bouazzaoui et al., 2010; Hodzik & Lemaire, 2011). Par exemple, dans le cadre de travaux relatifs à la mémoire, il a été montré que le vieillissement se caractérisait par une moindre utilisation de stratégies mnésiques internes¹⁵, majoritairement expliquée par l'altération des fonctions exécutives (Bouazzaoui et al., 2010). Par ailleurs, il est reconnu que cette altération liée à l'âge est associée à une moindre efficacité des activités quotidiennes, telles que la marche (Al-Yahya et al., 2011; Gonzales et al., 2016; Leyva et al., 2017; Shimada et al., 2016; Wollesen et al., 2016) ou la conduite automobile (Adrian et al., 2011; Aksan et al., 2015; Daigneault et al., 2002; Vaughan & Giovanello, 2010; Wiseman & Souder, 1996). Daigneault et al. (2002) ont par exemple mis en évidence que de faibles performances exécutives¹⁶ chez la personne âgée entraînaient un risque accru d'accident de la route.

Ainsi, une meilleure caractérisation des effets du vieillissement sur les fonctions exécutives, et de leurs conséquences sur le quotidien, apparaît cruciale dans la recherche du maintien de l'autonomie de la personne âgée.

¹⁵ Dans le domaine de la mémoire, les *stratégies internes* illustrent les procédures intra-individuelles mises en place par l'individu pour faciliter le rappel d'informations (ex. répétition de l'information, recherche du cadre spatiotemporel associé, imagerie visuelle). Les *stratégies externes* renvoient à des aides mémoire externes (ex. prendre des notes, demander un rappel à son entourage) (Madoglou, 2011; Paquette, 2009).

¹⁶ Dans cette étude, une batterie de tests regroupant le test de Stroop, le test de classement de cartes de Wisconsin, la tour de Londres et le trail making test a été réalisée par 60 sujets âgés en moyenne de 70.2 ans.

Parmi les fonctions exécutives, l'inhibition bénéfique d'une attention spécifique dans les travaux relatifs au vieillissement, notamment depuis l'approche proposée Hasher & Zacks (1988) qui suggèrent que l'origine des altérations cognitives observées chez la personne âgée serait liée à une atteinte de la fonction d'inhibition.

III.1 Travaux de Hasher & Zacks (1988)

Mobilisés au cours de nombreuses tâches, l'intégrité des processus inhibiteurs est nécessaire à l'efficacité d'une large variété de comportements et ce, quel que soit l'âge. L'hypothèse selon laquelle le vieillissement se caractériserait par un déficit d'inhibition a depuis longtemps été envisagée. Déjà en 1959, James Birren soutenait l'existence d'une altération des capacités d'inhibition, tant d'un point de vue cognitif que physiologique (Birren, 1959). En 1965, grâce à la mobilisation d'une tâche de recherche visuelle face à une planche affichant plusieurs lettres, Rabbitt mettait en évidence chez la personne âgée une diminution de la capacité à identifier une lettre cible quand d'autres lettres dites *distractrices* doivent être ignorées simultanément [i.e., $p < 0.001$, TR d'identification sujets jeunes ($n = 11$, 17-24 ans) < TR d'identification sujets âgés ($n = 11$, 65-74 ans)] (Rabbitt, 1965). Néanmoins, il faut attendre 1988 pour que l'inhibition se voie attribuer un rôle prépondérant dans la dimension cognitive du vieillissement.

La théorie du déficit d'inhibition proposée par Hasher & Zacks (1988) soutient que le déclin cognitif lié à l'âge trouverait son origine dans l'altération des processus inhibiteurs. Selon ces auteurs, cette altération spécifique engendrée par le vieillissement entraînerait une dégradation du contrôle et de la gestion des représentations activées en mémoire de travail. Lors d'une action, les personnes âgées rencontreraient par exemple de lourdes difficultés à inhiber les

informations anciennement pertinentes, altérant ainsi son bon déroulement (Hasher & Zacks, 1988; Lustig et al., 2007). Dès lors, ces difficultés de contrôle inhibiteur du contenu de la mémoire de travail favoriseraient les phénomènes d'interférence, auxquels les personnes âgées seraient plus vulnérables que les jeunes adultes (MacLeod, 1991; Troyer et al., 2006).

Dans la lignée de ce modèle théorique du déficit d'inhibition, de nombreux travaux ont cherché à caractériser les effets de l'avancée en âge sur les processus inhibiteurs. Les conclusions rapportées quant à l'effet du vieillissement divergent, soulevant ainsi un véritable débat autour des répercussions du vieillissement sur les différents processus inhibiteurs.

III.2 Inhibition et vieillissement : des résultats divergents

1. Déclin des processus inhibiteurs

De nombreuses études, mettant en œuvre différents paradigmes expérimentaux, ont permis de corroborer l'hypothèse d'un déficit d'inhibition chez la personne âgée (Hasher & Zacks, 1988). Parmi les plus couramment utilisés, notamment dans le domaine clinique (Balota et al., 2010; Bezdicek et al., 2015; Hutchison et al., 2010; Moroni & Laurent, 2006; Ramos-Goicoa et al., 2016), le test de Stroop et ses variantes [ex. version Stroop Victoria] ont permis de rendre compte des effets de l'âge sur la sensibilité à l'interférence. A de très nombreuses reprises, cette sensibilité a été observée comme étant plus élevée¹⁷ chez la personne âgée que chez le jeune adulte (Davidson et al., 2003; Houx et al., 1993; Mayas et al., 2012; Seo et al., 2008; Spieler et al., 1996; West, 2004; West & Alain, 2000). En effet, la cinétique d'évolution de la sensibilité à l'interférence a été décrite comme étant fortement marquée au cours de l'enfance, diminuer au

¹⁷ Cette sensibilité plus élevée est illustrée par un nombre d'items moins important rapporté en 45 secondes (test de Stroop) ou un temps plus important nécessaire pour rapporter les 24 items qui composent la tâche d'interférence de la version Stroop Victoria (ex. Moroni & Bayard, 2009).

cours de l'adolescence et se stabiliser à l'âge adulte pour enfin réapparaître fortement à partir de 60 ans (MacLeod, 1991; Moroni & Bayard, 2009).

Cette sensibilité accrue a également été observée vis-à-vis des effets d'amorçage négatif¹⁸ (Bherer et al., 2004; Connelly & Hasher, 1993; Kane et al., 1994; Tipper, 1991; Verhaeghen & De Meersman, 1998). Plus spécifiquement, ces effets renvoient à un allongement du temps de traitement d'un stimulus spécifique lorsque celui-ci était précédemment considéré comme un distracteur (Dalrymple-Alford & Budayer, 1966). Or, les travaux susmentionnés décrivent un temps de traitement réduit de ce stimulus spécifique chez la personne âgée, soulignant ainsi une dégradation des processus inhibiteurs associés au vieillissement.

Quant aux capacités d'inhibition de réponse, elles ne font pas exception puisqu'un effet délétère du vieillissement a été observé autant lors de la réalisation de tâches d'anti-saccades [Hallett, 1978] (Bowling et al., 2015; Butler et al., 1999; Olincy et al., 1997; Olk & Jin, 2011; Wang et al., 2013), de Go/NoGo (Fujiyama et al., 2011; Hsieh et al., 2016; Mudar et al., 2015; Nielson et al., 2002a; Vallesi et al., 2009, 2010) ou de Stop Signal (Andrés et al., 2008; Coxon et al., 2012; Hsieh & Lin, 2016; Sebastian et al., 2013).

Néanmoins, il est important de souligner que les résultats rapportés dans la littérature ne sont pas toujours en accord avec la théorie de Hasher & Zacks (1988). En effet, une altération des processus inhibiteurs n'a pas été systématiquement mise en évidence chez l'adulte âgé, y compris lors de l'utilisation des tâches expérimentales susmentionnées.

¹⁸ Un *effet d'amorçage* reflète l'influence de la présentation préalable d'un stimulus (l'amorce) sur le traitement d'un stimulus consécutif (la cible). L'amorçage est considéré comme négatif lorsque l'amorce présentée perturbe le traitement de la cible.

2. Conservation des processus inhibiteurs

Certains travaux ont en effet mis en évidence que les personnes âgées pouvaient présenter des performances équivalentes à celles de jeunes adultes aux tests de Stroop (Kieley & Hartley, 1997), d’amorçage négatif (Langley et al., 1998; Sullivan & Faust, 1993), d’anti-saccades (Kramer et al., 2000) et de Go/NoGo (Stawarczyk et al., 2012). De même, en utilisant l’épreuve de l’oubli dirigé¹⁹, certains auteurs ont relevé des performances similaires au cours de l’avancée en âge (Sego et al., 2006; Zellner & Bäuml, 2006), alors que d’autres travaux, mobilisant cette même épreuve, rapportent des résultats opposés (Earles & Kersten, 2002; Titz & Verhaeghen, 2010; Zacks et al., 1996). Dans la même optique, les profils de résultats obtenus à la tâche de Flanker présentent également certaines divergences selon les auteurs. Certains soulignent un déclin de la capacité de suppression de l’interférence chez la personne âgée (Wild-Wall et al., 2008; Zeef et al., 1996) alors que d’autres montrent le maintien de cette dernière (Hsieh & Fang, 2012; Hsieh & Lin, 2014; Hsieh et al., 2012; Kawai et al., 2012).

L’hétérogénéité des résultats relatifs aux effets de l’âge sur la fonction d’inhibition a notamment été mise en relation avec les différences méthodologiques pouvant exister entre les tâches, telle que par exemple la modalité manuelle ou verbale des réponses lors de la tâche de Stroop (Kieley & Hartley, 1997). Porter une attention spécifique sur l’impact de la modalité de réponse sur les performances inhibitrices semble donc pertinent dans l’étude de cette fonction d’inhibition. Néanmoins, cette hétérogénéité des résultats a surtout amené à considérer l’hypothèse d’une atteinte sélective des différents processus inhibiteurs face au vieillissement.

¹⁹ L’*oubli dirigé* a été développé afin d’observer expérimentalement le processus d’oubli intentionnel (MacLeod, 1999). Dans une telle épreuve, une liste composée d’items à oublier et d’items à mémoriser est présentée au sujet. Après présentation de l’ensemble des items, il lui est demandé de rappeler les items, que ces derniers aient été initialement catégorisé « à oublier » ou « à mémoriser ». Le résultat caractéristique est que le sujet présente un moindre rappel des items à oublier que de ceux à mémoriser (Basden et al., 1993; Whetstone et al., 1996).

3. Inhibition et vieillissement : une atteinte sélective

Les travaux s'intéressant à l'effet du vieillissement sur différents processus inhibiteurs n'ont pas mis en évidence une atteinte de chacun des processus modélisés dans la littérature (Harnishfeger, 1995; Hasher et al., 1999; Nigg, 2000). Dès lors, l'hypothèse d'une atteinte sélective, avec l'âge, du fonctionnement de certains de ces processus inhibiteurs a été envisagée.

L'étude d'Andrés et al. (2008) est l'une des plus couramment citée pour rendre compte de l'atteinte sélective au cours de l'âge de processus inhibiteurs spécifiques. Basée sur la conception multidimensionnelle de l'inhibition proposée par Nigg (2000), dissociant les processus inhibiteurs contrôlés des processus automatiques, cette étude visait à évaluer si les déficits associés au vieillissement s'observaient sur ces processus inhibiteurs distincts. Pour ce faire, les processus inhibiteurs contrôlés, reflétant la suppression consciente et délibérée des informations ou réponses inadaptées à la tâche, ont été évalués par le test de Stroop ou du Stop signal. Les processus inhibiteurs automatiques, reflétant la suppression des représentations non-pertinentes en amont du champ de la conscience, étaient évalués par le biais du paradigme d'amorçage négatif. Comparant les performances de 76 jeunes adultes (22.2 ± 3 ans) et de 73 adultes âgés (71.7 ± 7.5 ans), ces auteurs ont mis en évidence une dégradation spécifique de l'inhibition au cours de l'avancée en âge, localisée exclusivement au niveau des processus contrôlés, coûteux en ressources attentionnelles (Andrés et al., 2008).

Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Collette et al. (2009a). Il s'agissait d'évaluer, d'une part, les processus inhibiteurs contrôlés par l'intermédiaire de deux tâches

d’oubli dirigé et du test de Hayling²⁰ et, d’autre part, les processus inhibiteurs automatiques grâce notamment à une tâche d’oubli par récupération²¹. Leurs résultats ont rapporté de moindres performances d’inhibition avec l’âge lors des tâches d’oubli dirigé (nombre d’erreurs sujets jeunes < nombre d’erreurs sujets âgés, chaque $p < 0.001$) et de Hayling (TR sujets jeunes < TR sujets âgés, $p < 0.05$) tandis qu’aucune différence n’était rapportée pour la tâche d’oubli par récupération. Le vieillissement se caractérise donc par une atteinte sélective des processus inhibiteurs, cette dernière étant observable uniquement face aux processus inhibiteurs contrôlés (Collette et al., 2009a).

Ces quelques exemples alimentent l’hypothèse selon laquelle l’atteinte des processus inhibiteurs face au vieillissement serait sélective et soutiennent ainsi la conception multiple de la fonction d’inhibition, assurée par une pluralité de processus spécifiques et distincts.

III.3 Inhibition perceptive, inhibition motrice et vieillissement

Les processus distincts d’IP et d’IM renvoient respectivement à la suppression des informations et des réponses prépondérantes mais inadaptées à la tâche. A l’heure actuelle, seules quelques études ont mobilisé le paradigme de Nassauer & Halperin (2003) pour rendre compte

²⁰ Développé par Burgess et Shallice (1996), l’objectif du *test de Hayling* est de compléter des phrases en évitant les automatismes afin de mesurer l’inhibition des réponses automatiques. Le sujet doit compléter des phrases dont le dernier mot est manquant, soit par un mot congruent (ex. à l’automne, les arbres perdent leurs *feuilles*), soit en résistant à la réponse automatique pour donner un mot non-congruent (ex. à l’automne les arbres perdent leurs *gâteaux*) (Grosselin et al., 2010).

²¹ La *tâche d’oubli* induit par la récupération (de l’anglais *retrieval-induced forgetting*) nécessite la récupération sélective d’informations au moyen d’un indice ainsi que l’inhibition des autres souvenirs associés (Anderson et al., 1994). Par exemple, pour récupérer une information à partir d’un indice (ex. retrouver *orange* à partir de *fruits*), plusieurs représentations sont activées en mémoire (ex. orange, pomme, fraise) et sont donc en compétition. Pour sélectionner celle qui correspond à la réponse adéquate (orange), les autres sont inhibées et deviennent alors inaccessibles.

des effets de l'âge sur ces capacités d'inhibition. Ainsi, la cinétique d'évolution au cours du vieillissement de l'IP et l'IM n'est que peu décrite au sein de la littérature.

Seules quelques études ont mobilisé ce paradigme entre 2007 et 2014 afin d'évaluer les potentiels changements de ces capacités spécifiques chez la personne âgée (Tableau 1, pages 39-40). Parmi elles, certains auteurs ont testé les capacités d'IP et d'IM dans une configuration de simple tâche [i.e., assis devant un ordinateur, réponse manuelle] (Germain & Collette, 2008; Jennings et al., 2011; Mendelson et al., 2010; Redfern et al., 2009; Schmiedt-Fehr et al., 2007; Stawarczyk et al., 2012), les autres les évaluant dans une configuration dynamique d'initiation du pas (Sparto et al., 2013, 2014). En outre, seule l'étude de Germain & Collette (2008) avait pour objectif de tester spécifiquement si la distinction des processus d'IP et d'IM était, à l'instar du jeune adulte, observable chez la personne âgée. Les autres études susmentionnées, abordées ci-après, partaient du postulat que l'IP et l'IM étaient deux processus différenciés et ne réalisaient donc pas la tâche de résolution simultanée des conflits perceptif et moteur (cf. Figure 3, page 37).

1. Apports de Germain & Collette (2008) : temps de réaction et méthode des facteurs additifs

En reprenant l'ensemble des tâches conçues par Nassauer & Halperin (Figure 2 et 3, page 35 et 37), Germain & Collette (2008) ont comparé les TR obtenus lors de la résolution de conflit perceptif et/ou moteur par des sujets jeunes ($n = 40$, 24.1 ± 1.7 ans) à ceux obtenus par des sujets âgés ($n = 35$, 66.7 ± 5.2 ans). L'objectif était d'évaluer si les ressources cognitives mobilisées lors de l'expression des processus d'IP et d'IM chez la personne âgée étaient distinctes ou communes. Chez le sujet jeune, leurs résultats ont confirmé le profil de performances obtenu dans l'étude princeps [i.e., allongement du TR en présence de chaque type de conflit et allongement additif du TR lors de leur résolution simultanée]. En revanche, l'effet d'additivité

des TR n'a pas été observé chez le sujet âgé. En effet, au-delà de leurs moindres performances de TR en IP et en IM, la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur (cf. Figure 3) entraîne chez la personne âgée un effet d'interaction²². L'effet d'interaction suggérerait l'atteinte d'un même stade du traitement de l'information, reflétant le chevauchement des ressources cognitives mobilisées par les processus d'IP et d'IM. En d'autres termes, chez la personne âgée, le fonctionnement de ces deux processus inhibiteurs nécessiterait l'utilisation de ressources cognitives pour une part communes. Ces auteurs interprètent ce résultat comme l'illustration d'un phénomène de dédifférenciation²³ de ces processus avec l'âge (Germain & Collette, 2008). Cette interprétation a trouvé écho dans de nombreux travaux issus du domaine de la neuroimagerie fonctionnelle, attestant de ce phénomène de recrutement de régions corticales additionnelles chez la personne âgée lors de la réalisation de tâches cognitives de haut niveau (Cabeza, 2002; Cabeza et al., 2002; Grady, 2012; Grady et al., 2006; Greenwood, 2007; Li & Lindenberger, 1999; Park et al., 2004; Spreng et al., 2010).

Par ailleurs, il est important de souligner que l'atteinte des capacités d'inhibition mise en évidence par Germain & Collette (2008) n'était pas sélective. La résolution de chaque type de conflits engendrait des performances significativement dégradées chez la personne âgée. Ainsi, le vieillissement affecterait dans la même mesure ces processus inhibiteurs contrôlés d'IP et d'IM, tels qu'évalués par ce paradigme spécifique. Une diminution des ressources cognitives

²² Plus précisément, le TR en configuration neutre était égale à : **521** ms, TR IP : **705** ms, TR IM : **724** ms, TR IP&IM : **834** ms. Le coût associé au conflit perceptif était de 184 ms (705 – 521 ms), celui du conflit moteur était de 203 ms (724 – 521 ms) tandis que celui du conflit combiné était de 313 ms (834 – 521 ms). Ces résultats illustrent ainsi un **effet d'interaction** puisqu'il ne s'agit pas d'un allongement additif du TR (184 + 203 = 387 vs. 313 ms).

²³ Ce phénomène de **dédifférenciation** est interprété comme une difficulté de la personne âgée à activer les circuits neuronaux spécialisés dans le traitement d'une tâche spécifique (Li & Lindenberger, 1999).

disponibles en mémoire de travail pourrait notamment expliquer ces moindres performances inhibitrices chez l'adulte âgé (Stawarczyk et al., 2012).

2. Apports de variables dépendantes alternatives : temps de réaction vs. scores d'inhibition

D'autres études avaient pour but d'évaluer l'effet du vieillissement sur les processus d'IP et d'IM, indépendamment l'un de l'autre (Jennings et al., 2011; Mendelson et al., 2010; Redfern et al., 2009; Stawarczyk et al., 2012). Pour ce faire, chacune de ces études a mobilisé le paradigme de Nassauer & Halperin (2003), à l'exception de la tâche IP&IM nécessitant la résolution simultanée des deux conflits étudiés²⁴.

En analysant séparément les TR en condition d'IP et d'IM²⁵, Stawarczyk et al. (2012) s'accordent sur le fait que le vieillissement s'accompagne d'un déficit d'inhibition, observable sous la forme d'un allongement du TR face à la résolution du conflit perceptif [IP] et moteur [IM]. Mobilisant uniquement la configuration expérimentale présentant un conflit perceptif (Figure 2-A, page 35), Schmiedt-Fehr et al. (2007) ont également observé une diminution des capacités d'IP [i.e., allongement du TR] chez la personne âgée. Ces auteurs soulignent que cette altération ne peut être uniquement imputée au ralentissement de la vitesse de traitement de l'information classiquement observée avec l'âge. En effet, les mesures électroencéphalographiques enregistrées lors de ces tâches ont mis en évidence des activations

²⁴ Pour rappel, cette tâche est mobilisée uniquement dans le but de rendre compte d'une potentielle distinction des processus inhibiteurs mis en jeu lors de la résolution des conflits perceptif et moteur.

²⁵ Deux analyses de variance étaient réalisées sur le TR médian: **1/** Age (2 : jeunes adultes vs. adultes âgés) * Conflit perceptif (2 : réponses neutres vs. non-congruentes); et **2/** Age (2 : jeunes adultes vs. adultes âgés) * Conflit moteur (2 : réponses congruentes vs. non-congruentes).

Il est important de souligner que dans cette étude la tâche évaluant l'IM était différente de la tâche d'IM proposée par Nassauer & Halperin (2003). Les stimuli étaient des rectangles apparaissant à droite et à gauche de l'écran. Un essai non-congruent nécessitait de répondre à l'inverse du lieu d'apparition du rectangle.

corticales différentes en fonction de l'âge. Ces auteurs suggèrent ainsi que des stratégies cognitives moins efficaces sont mises en place par le sujet âgé pour résoudre le conflit présenté.

D'autres travaux ont réalisé une comparaison statistique de l'IP et de l'IM sur la base d'une variable dépendante alternative aux TR « brutes », à savoir des scores d'inhibition (Jennings et al., 2011 ; Mendelson et al., 2010 ; Redfern et al., 2009). Ces scores étaient calculés à partir des TR, tels que décrits dans le Tableau 2. Plus précisément, deux scores illustrant les capacités d'IP ont été établis. D'un côté, le score d'IP_{n°1} définit ces capacités par rapport aux essais congruents de la tâche considérée (Tableau 2-A). D'un autre côté, le score d'IP_{n°2} définit les capacités d'IP en prenant les essais congruents de la tâche d'IM, dite neutre, comme référence (Tableau 2-B). Concernant les capacités d'IM, un seul score a été établi par rapport aux essais neutres (Tableau 2-C).

Tableau 2. Illustration des scores utilisés pour rendre compte des capacités d'inhibition perceptive [A, B] et d'inhibition motrice [C] (d'après Jennings et al., 2011).

Inhibition considérée		Score appliqué
A/	IP	$IP_{\text{Score } n^{\circ}1} = TR_{(\text{essais non-congruents IP})} - TR_{(\text{essais congruents IP})}$
B/	IP	$IP_{\text{Score } n^{\circ}2} = TR_{(\text{essais non-congruents IP})} - TR_{(\text{essais congruents IM})}$
C/	IM	$IM_{\text{Score}} = TR_{(\text{essais non-congruents IM})} - TR_{(\text{essais congruents IM})}$

Note. IP : inhibition perceptive; IM : inhibition motrice; TR : temps de réaction.

Note. Voir Figure 2-A (page 35) pour illustration des essais : non-congruents IP, congruents IP, et Figure 2-B pour les essais non-congruents IM, congruents IM. Il est important de souligner que les essais congruents IM sont considérés comme neutres puisque aucune résolution de conflit n'est nécessaire.

De manière générale, une dégradation est observée avec l'âge, quelle que soit l'inhibition. Cependant, en fonction du score considéré, des résultats divergents ont été rapportés (Jennings et al., 2011). La comparaison des scores d'IP_{n°1} et d'IM a révélé de moindres capacités d'IM chez les sujets évalués [i.e., score IP_{n°1} = 45 ms vs. score IM : 125 ms]. Or, lorsque la même analyse a été réalisée sur les scores d'IP_{n°2} et d'IM, les capacités d'IP étaient inférieures à celles d'IM [score IP_{n°2} = 158 ms vs. score IM : 125 ms] (Jennings et al., 2011). Néanmoins, suite à ces résultats, aucune précision quant au score d'IP à privilégier n'a été indiquée par ces auteurs.

Pour conclure, l'ensemble des travaux abordés tend à confirmer les résultats princeps de Germain & Collette (2008) illustrant une dégradation des processus d'IP et d'IM au cours du vieillissement. Néanmoins, une attention particulière doit être portée aux variables dépendantes à considérer dans les analyses statistiques, notamment lorsque les performances d'IP et d'IM sont comparées. Etant donné la divergence de résultats obtenus par l'intermédiaire des scores d'inhibition et le peu de consignes théorique et/ou méthodologiques associées à leur utilisation, ces scores ne seront pas mobilisés dans le cadre de cette thèse. Les variables dépendantes considérées seront, à l'instar des travaux princeps (Germain & Collette, 2008 ; Nassauer & Halperin, 2003), les TR obtenus lors de chaque tâche expérimentale.

Parmi les études ayant mobilisé ce paradigme afin d'étudier les capacités d'IP et d'IM chez la personne âgée, deux d'entre elles ont évaluées ces capacités spécifiques dans une configuration « dynamique » [i.e., réponse attendue : initiation d'un pas] (Sparto et al., 2013, 2014a). En effet, il est aujourd'hui reconnu que le déclin lié à l'âge des capacités inhibitrices, et plus largement des fonctions exécutives, participe à la dégradation des actions motrices quotidiennes, favorisant ainsi

la perte d'autonomie²⁶ et le risque de chute chez la personne âgée (Dalton et al., 2016; Jefferson et al., 2006; Martin et al., 2013; Schoene et al., 2015). Cette interaction entre l'inhibition et la fonction motrice²⁷ évolue au cours de l'avancée en âge et sera abordée dans la suite de ce manuscrit.

Afin d'introduire l'étude de cette interaction *inhibition-fonction motrice* chez la personne âgée, une attention particulière sera tout d'abord portée sur les conséquences du vieillissement sur la fonction motrice.

²⁶ L'autonomie est classiquement définie comme la capacité d'un individu à effectuer les tâches de la vie quotidienne sans assistance extérieure (Haute autorité de santé, 2005). Ainsi, la *perte d'autonomie* confronte la personne âgée à une perte de cette liberté. En 2010, une étude menée par l'Ipsos a rapporté que pour 56% des français, la perte de l'autonomie constituait la principale appréhension liée au vieillissement.

²⁷ La *fonction motrice* renvoie à l'ensemble des systèmes [ex. sensoriels, nerveux] et des structures [ex. muscles] qui sous-tendent la motricité. Dans le cadre de cette thèse, le terme « fonction sensori-motrice » sera également utilisé pour mettre l'accent sur l'aspect sensoriel de la fonction motrice.

Chapitre III. En quelques mots

- *Le déclin de l'inhibition est considéré comme l'un des facteurs à l'origine du vieillissement cognitif.*
- *Les études évaluant les effets de l'âge sur les différents processus inhibiteurs présentent des résultats divergents (déclin vs. conservation), alimentant ainsi un débat autour de cette question.*
 - *L'âge induit une atteinte sélective des processus inhibiteurs contrôlés tandis que les processus automatiques semblent épargnés.*
- *Concernant les inhibitions perceptive et motrice, le vieillissement amène à une atteinte globale de ces deux processus inhibiteurs.*
- *Par précaution, l'étude des inhibitions perceptive et motrice se fera uniquement via l'analyse des temps de réactions obtenus lors de chaque tâche expérimentale du paradigme de Nassauer & Halperin (2003)*

Et maintenant : Quels sont les effets du vieillissement sur la fonction motrice et les différents systèmes qui la sous-tendent ?

IV. Effets de l'âge sur la fonction motrice

IV.1. Posture, marche et vieillissement

Toute activité quotidienne nécessite de disposer d'une posture stable (Massion, 1998). L'équilibre orthostatique, c'est à dire le maintien actif du corps dans l'espace, est considéré comme un processus dynamique continuellement mis à l'épreuve par un environnement en constante évolution. Il est classiquement admis que son contrôle, notamment sous-tendu par le maintien de la projection orthogonale du centre de masse²⁸ à l'intérieur de la base de sustentation, est dégradé avec l'âge. En effet, une augmentation des déséquilibres posturaux [i.e., altération du contrôle postural] au cours du vieillissement a été rapportée à de nombreuses reprises (Abrahamová & Hlavacka, 2008; Hytönen et al., 1993; Pyykkö et al., 1988). Mesurés pour la première fois par l'intermédiaire d'une plateforme de force en 1963, Joseph Sheldon établit une cinétique d'évolution de ces déséquilibres. Ces derniers diminuent entre l'enfance et l'adolescence pour atteindre une stabilité optimale à l'âge adulte puis augmentent significativement à partir de la quatrième décennie de vie (Sheldon, 1963). Depuis, de nombreuses études ont corroboré ces observations (Abrahamová & Hlavacka, 2008; Du Pasquier et al., 2003; Hytönen et al., 1993; Kouzaki & Masani, 2012; Onambele et al., 2006; Pyykkö et al., 1988; Qiu et al., 2012), certains auteurs soulignant même que cette augmentation liée à l'âge était plus importante chez la femme (Overstall et al., 1977). Néanmoins, la modélisation de cette évolution diffère quelque peu en fonction des études. Parmi les plus couramment cités, Du Pasquier et al. (2003), évaluant des sujets âgés de 25 à 83 ans, présentaient une relation linéaire entre l'âge et la stabilité posturale, suggérant ainsi que cette dernière s'altère progressivement au cours de l'avancée en âge. L'évaluation de sujets âgés de 20 à 82 ans par Abrahamova &

²⁸ Le centre de masse correspond au barycentre du corps.

Hlavacka (2008) a mis en évidence une relation curvilinéaire entre l'âge et les déséquilibres posturaux, soulignant une accentuation particulière de ces déséquilibres à partir de 60 ans.

La production et le maintien d'une posture stable sont nécessaires à tout acte locomoteur, dont la marche. Au-delà d'une altération de l'équilibre orthostatique, le vieillissement s'accompagne aussi d'une modification des caractéristiques locomotrices. En effet, la personne âgée marche en moyenne plus lentement qu'un jeune adulte (Bohannon, 1997; Prince et al., 1997; Winter et al., 1990; Woo et al., 1995), notamment en raison d'une augmentation du temps passé en « double appui » au sol (Ferrandez et al., 1990) et de la diminution de la longueur de pas (Lord et al., 1996). Ces observations refléteraient une stratégie compensatrice de leurs moindres capacités physiques, caractérisée par le contrôle plus prudent et moins coûteux en énergie d'un profil de marche moins déstabilisant (Caetano et al., 2016a; Schrack et al., 2010; Woollacott & Tang, 1997). L'avancée en âge se traduit également par une variabilité plus importante des paramètres spatio-temporels de la marche [ex. longueur et largeur du pas aléatoire, placement et élévation du pied inadaptée (Barrett et al., 2010; Kang & Dingwell, 2008; LaRoche et al., 2012)]. Certains auteurs suggèrent que cette variabilité accrue serait une des conséquences de l'inclinaison supérieure du tronc (Kang & Dingwell, 2008) ou d'une faiblesse des fléchisseurs plantaires (LaRoche et al., 2012).

Conjointement à ces modifications, le vieillissement affecte également le mode de contrôle de la fonction motrice. En effet, chez le jeune adulte, son contrôle est considéré comme automatique et implicite, essentiellement assuré par les circuits spinaux et sous-corticaux (Clark, 2015; Nutt et al., 1993; Paul et al., 2005). Chez la personne âgée, la fonction motrice nécessite davantage de ressources attentionnelles, témoignant également d'un contrôle cortical (Beauchet & Berrut, 2006; Beauchet et al., 2003).

Par ailleurs, il est important de souligner que de nombreux travaux ont rapporté que ces différentes altérations liées au vieillissement affectaient la capacité à réagir de manière efficace face à un obstacle ou une perturbation, favorisant ainsi le risque de chutes chez la personne âgée (Hausdorff et al., 2005; Maki, 1997; Maki et al., 1994; Muir et al., 2013; Pajala et al., 2008).

IV.2. Fonction neuromusculaire et vieillissement

Le vieillissement provoque une atteinte de l'ensemble des tissus vivants de l'organisme parmi lesquels le muscle (Coggan et al., 1992), à l'instar de l'os (O'Flaherty, 2000) et du cartilage (Felson, 1988), ne fait pas exception. Parmi ces atteintes, la sarcopénie, illustrant la perte de masse musculaire liée à l'âge (Rosenberg, 1997), engendre une altération significative des propriétés fonctionnelles [i.e., contractilité, excitabilité (Butler-Browne & Bigard, 2006)] et mécaniques du muscle [ex. relation force-longueur] (Narici & Maffulli, 2010). Ce processus est considérée comme particulièrement délétère puisqu'il est directement relié au risque de chute ainsi qu'à l'entrée dans la dépendance (Vellas et al., 2000).

D'un point de vue fonctionnel, les diminutions de force et de puissance musculaire sont concomitantes aux altérations structurelles liées à la sarcopénie (Doherty et al., 1993; Macaluso & De Vito, 2004; Vandervoort, 2002). Les diminutions de la force et de la puissance musculaire des membres inférieurs ont été respectivement estimées à 1,5% et 3,5% chaque année à partir de 65 ans (Foldvari et al., 2000). Non sans conséquences sur les comportements moteurs quotidiens [ex. diminution de la vitesse de marche (Barbat-Artigas et al., 2016)], ces diminutions augmente le risque de mortalité (Landi et al., 2013).

L'ensemble de ces facteurs est à l'origine, pour une part, des difficultés motrices de la personne âgée, telles que par exemple de l'initiation du pas (Melzer et al., 2007) et de la gestion d'une perturbation [ex. application d'une poussée au niveau des hanches (Mille et al., 2013)].

IV.3. Systèmes sensoriels et vieillissement

Le contrôle postural orthostatique est dépendant d'un ensemble d'informations afférentes issues des systèmes sensoriels visuel, vestibulaire et proprioceptif (Fitzpatrick & McCloskey, 1994; Lakie & Loram, 2006). Ces informations renseignent l'individu sur la nature des diverses stimulations issues de son propre organisme et/ou de son environnement physique et social (Rigal, 1995), lui permettant ainsi de réagir de manière adaptée aux évènements qui y surviennent. Chacun de ces systèmes étant dégradés par l'avancée en âge, ils participent à l'altération de la fonction motrice au cours du vieillissement.

1. Le système visuel

Les informations visuelles permettent au système nerveux central d'appréhender l'environnement et d'en extraire les différentes caractéristiques des objets et individus présents, telles que l'orientation ou la vitesse de mouvements de ces derniers (Lorenceanu, 1996). Ces informations participent au contrôle de la fonction motrice puisqu'elles renseignent l'individu sur les mouvements de son corps par rapport à son environnement. Une augmentation de 20% à 70% des déséquilibres posturaux a par exemple été rapportée lorsque l'équilibre orthostatique d'un individu jeune ou âgé est évalué les yeux fermés (Lord et al., 1991, 2010; Paulus et al., 1984), soulignant ainsi l'importance des informations visuelles dans la régulation posturale.

De multiples travaux ont mis en évidence une altération progressive du système visuel avec l'avancée en âge (Cerella, 1985; Cristarella, 1977; Gittings & Fozard, 1986; Kline, 1987; Whitaker & Elliott, 1992). Cette altération s'exprime au niveau de l'acuité visuelle (Clark et al., 1993), de la capacité à distinguer les couleurs (Kline et al., 1982) et les contrastes (Owsley et al., 1983; Sekuler & Hutman, 1980). Plus impactant encore pour le contrôle de la fonction motrice, il

est reconnu que l'âge réduit le champs visuel et la perception de sa profondeur (Nevitt et al., 1989), augmentant ainsi le risque de chute (Clark et al., 1993; Lord & Dayhew, 2001).

2. Le système vestibulaire

Les afférences vestibulaires renseignent le système nerveux central sur la position et le mouvement de la tête dans l'espace. Codant en permanence l'accélération gravitaire, le système vestibulaire perçoit également les accélérations et ses variations subies ou déclenchées par les mouvements de l'individu, et ce, dans les trois dimensions de l'espace (Clark, 1970; Rodenburg et al., 1981). Il est reconnu que ce système sensoriel contribue au contrôle postural statique et dynamique, notamment par l'intermédiaire des faisceaux vestibulo-spinaux responsables de l'activation des muscles antigravitaires (Borel et al., 2008; Fredrickson et al., 1974).

Il a été montré que le vieillissement amène une déficience du fonctionnement vestibulaire (Enrietto et al., 1999; Fife & Baloh, 1993; Zalewski, 2015), entre autre engendrée par une réduction du nombre de fibres myélinisées au niveau du nerf vestibulaire (Bergström, 1973b, 1973a) et de cellules ciliées au niveau des organes otolithiques (Rosenhall & Rubin, 1975).

3. Le système proprioceptif

Composant du système somatosensoriel²⁹, le système proprioceptif renseigne l'individu sur la position des différents segments corporels les uns par rapport aux autres ainsi que par rapport à son environnement. Ces informations sont issues des différentes terminaisons nerveuses nommées *propriocepteurs* situées au sein des systèmes musculo-tendineux, des articulations, des fascias et de la peau (Röijezon et al., 2015; Rothwell, 1994) (Tableau 3). Les fibres afférentes

²⁹ Le *système somatosensoriel* permet à l'organisme de percevoir l'environnement et l'action en cours. Différents récepteurs, distribués sur l'ensemble du corps, permettent son articulation : les extérocepteurs (sensibilité tactile, thermique), les nocicepteurs (perception de la douleur) et les propriocepteurs.

associées à ces propriocepteurs jouent un rôle central dans le contrôle postural, notamment grâce à la transmission rapide de l'information permise par leur diamètre important (Jankowska, 1992).

Parmi ces propriocepteurs, les fuseaux neuromusculaires (FNM) sont considérés comme les plus importants (Proske, 2005). Organisés parallèlement aux fibres musculaires, ces FNM sont constitués d'une enveloppe de tissu conjonctif contenant des fibres intrafusales innervées par les fibres afférentes primaires [*fibres Ia*] et secondaires [*fibres II*] (Proske & Gandevia, 2012). Ces FNM renseignent l'organisme quant aux variations de longueur du muscle et la vitesse de ces variations (Proske, 1997) (Tableau 3). Le rôle central attribué à ces structures au sein du système proprioceptif est notamment soutenu par le fait que leur densité diffère selon le groupe musculaire considéré, illustrant ainsi une adéquation singulière de ces FNM avec les exigences spécifiques des différents segments corporels (Proske & Gandevia, 2012).

A l'instar des systèmes sensoriels précédemment abordés, le système proprioceptif est affecté par l'avancée en âge. Par exemple, une moindre capacité à détecter les mouvements³⁰ (Kokmen et al., 1978; Skinner et al., 1984) et un sens de la position³¹ altéré au niveau du coude (Herter et al., 2014; Roll et al., 1992), du genou (Petrella et al., 1997; Ribeiro & Oliveira, 2010) et de la cheville (Gilsing et al., 1995; You, 2005) ont été mis en évidence chez la personne âgée. Certains auteurs suggèrent que cette altération des qualités proprioceptives a une origine *centrale* [ex. atrophie des axones, dégradation des fibres myélinisées (Verdú et al., 2000)] tandis que

³⁰ L'évaluation du *sens du mouvement* (kinesthésie) d'un individu consiste à mesurer sa capacité à percevoir le mouvement de son membre, lorsque ce dernier est mobilisé passivement sans retour visuel (Lephart et al., 1994).

³¹ L'évaluation du *sens de la position* d'un individu consiste mesurer sa capacité à percevoir la position d'une de ses articulations dans l'espace et donc à pouvoir la reproduire à un angle articulaire déterminé après déplacement (Gandevia & McCloskey, 1976).

d'autres évoquent une origine *périphérique* [ex. diminution du nombre de propriocepteurs (Morisawa, 1998)].

Tableau 3. Principaux propriocepteurs du corps humain et caractéristiques associées
(d'après Röijezon et al., 2015)

<i>Localisation</i>	<i>Propriocepteur</i>	<i>Informations véhiculées</i>
Système musculo-tendineux	Fuseaux neuro-musculaires	→ Longueur du muscle [<i>Fibres Ia & II</i>] → Vitesse de variation de longueur du muscle [<i>Fibres Ia</i>]
	Organes tendineux de Golgi	→ Tension musculaire active [<i>Fibres Ib</i>]
Articulation	Corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Golgi, de Mazzoni	→ Niveaux de tension et de compression au cours du mouvement
Fascia	Corpuscules de Ruffini, de Pacini	→ Niveaux de tension et de compression au cours du mouvement articulaire
Peau	Corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Meissner Follicules pileux Disques de Merkel	→ Déformation du tissu superficiel → Niveaux de tension et de compression au cours du mouvement articulaire

IV.4. Système nerveux central et vieillissement

Les altérations sensorimotrices liées à l'âge sont considérées comme une source importante de morbi-mortalité chez la personne âgée puisqu'elles favorisent entre autres la sédentarité et le risque de chute (Jankovic et al., 2001; Maki & McIlroy, 1996; Sherrington et al.,

2004). Parallèlement, il est important de préciser que les modifications subies par le système nerveux central au cours du vieillissement contribuent à la dégradation de la fonction motrice. Il a par exemple été rapporté que le système nerveux central subit une perte neuronale importante à partir de la sixième décennie, illustrée notamment par une diminution d'environ 2% par décennie du poids total du cerveau (Achim et al., 2002). De plus, il a été observé que cette perte neuronale n'était pas un phénomène homogène, certains tissus et structures neuroanatomiques apparaissant plus vulnérables aux effets de l'âge que d'autres. Plus précisément, la substance grise, composée majoritairement des corps cellulaires de neurones, serait particulièrement atteinte par le vieillissement par rapport à la substance blanche essentiellement composée d'axones (Kitamura et al., 2016; Raz et al., 1997). Concernant les structures corticales, il apparaît que la diminution au cours de l'âge du volume de substance grise s'observe spécifiquement et précocement au niveau du cortex frontal (Sowell et al., 2003; Taki et al., 2011). Associé également à un dysfonctionnement des neurotransmetteurs dopaminergiques (Volkow et al., 2000), reconnus pour leur implication dans le contrôle de la fonction motrice (O'Sullivan et al., 1998), l'ensemble des modifications du système nerveux central participe à la fragilisation de la personne âgée ainsi qu'à une moindre efficacité de ses comportements moteurs [ex. initiation du pas, marche (Chen et al., 2015; Nadkarni et al., 2014; Rosano et al., 2012; Sparto et al., 2014a)].

Ainsi, bien que le vieillissement ne soit pas un processus linéaire, ni un processus uniforme à tous les individus (Pendergast et al., 1993), il engendre un déclin des différents systèmes et structures qui sous-tendent la fonction motrice. Le contrôle des performances motrices devient alors plus coûteux d'un point de vue énergétique (Berryman et al., 2017; Schrack et al., 2010) et attentionnel (Sparrow et al., 2002) pour la personne âgée.

Chapitre IV. En quelques mots

- *Le vieillissement amène une altération de l'ensemble des systèmes qui sous-tendent la fonction motrice.*
- *La personne âgée présente des difficultés à produire un comportement moteur stable et sécurisé et à faire face à une perturbation.*
 - *Le coût attentionnel associé au contrôle de la fonction motrice augmente avec l'âge.*
- *La dégradation du système proprioceptif avec l'âge favorise la fragilité de la personne âgée.*

Et maintenant : Quels sont les effets du déclin de l'inhibition lié à l'âge sur la fonction motrice ?

V. Interaction entre inhibition et fonction motrice au cours de l'âge

Le déclin des capacités cognitives et sensorimotrices lié à l'âge est très largement documenté dans la littérature. Au-delà de l'étude isolée de leur déclin, certains travaux se sont focalisés sur les interactions entre ces capacités spécifiques lors du vieillissement (Anstey & Smith, 1999; Bridenbaugh & Kressig, 2015; Li & Lindenberger, 2002; Lindenberger & Baltes, 1994; Schäfer et al., 2006; Stelmach & Nahom, 1992). Certains auteurs ont choisi d'examiner le lien entre cognition et fonction motrice par l'intermédiaire d'analyses statistiques corrélationnelles (Ghisletta et al., 2010; Kattenstroth et al., 2010; Lindenberger & Ghisletta, 2009; Shimada et al., 2016; Soumaré et al., 2009; Watson et al., 2010) quand d'autres ont mobilisé des études expérimentales mettant notamment en œuvre le paradigme de la double tâche (Anstey et al., 1997; Coppin et al., 2006; Gomes et al., 2015; Hahn et al., 2011; Simoni et al., 2013; Yeh et al., 2015).

L'interaction entre le déclin lié à l'âge des fonctions exécutives et l'altération de la stabilité posturale et de la marche est largement illustrée dans la littérature (Atkinson et al., 2007; Beurskens & O, 2012; Coppin et al., 2006; Forte et al., 2013; Holtzer et al., 2006; van Iersel et al., 2008; Springer et al., 2006; Sturnieks et al., 2012; Watson et al., 2010; Yogev et al., 2005; Yogev-Seligmann et al., 2008). Parmi les plus couramment citées, l'étude de Ble et al. (2005) a évalué 926 sujets âgés (74.6 ± 6.7 ans) lors d'une tâche de flexibilité mentale (Trail Making Test – TMT), ainsi que lors d'épreuves de marche sur des distances de 4 mètres et de 7 mètres avec obstacles [i.e., cube en caoutchouc de 6 ou 30 centimètres de hauteur]. Leurs résultats ont mis en évidence une association entre les performances exécutives et la vitesse de marche lors de l'épreuve de 7 mètres avec obstacles. Les fonctions exécutives joueraient ainsi un rôle significatif dans les tâches motrices de la personne âgée, et ce, d'autant plus lorsque leur complexité

augmente. Autre exemple, Shimada et al. (2016) soulignent que les sujets âgés ayant une moindre capacité à réaliser les tâches quotidiennes [ex. prendre le bus, faire le ménage (Lawton & Brody, 1969)] présentent de moindres capacités exécutives [i.e., flexibilité mentale]. Par ailleurs, via la mobilisation du paradigme de la double tâche, une dégradation des caractéristiques de la marche a été rapportée chez le sujet âgé lorsqu'il lui était demandé simultanément d'énoncer le plus de noms d'animaux possible (Bootsma-van der Wiel et al., 2003) ou d'effectuer une tâche d'empan de chiffres³² (McCulloch et al., 2009).

Etant donné le rôle central attribué à l'inhibition dans le vieillissement cognitif (Hasher & Zacks, 1988), questionner son interaction spécifique avec la fonction motrice chez la personne âgée semble particulièrement pertinent.

V.1. Apports des travaux mobilisant les tests de Stroop ou du Go/NoGo

1. Apports des études corrélationnelles

La démarche adoptée par les études corrélationnelles consiste à évaluer les sujets au cours de différentes tâches expérimentales puis d'analyser les corrélations entre les performances obtenues au cours de ces dernières. L'hypothèse associée à ce type d'analyse est que l'obtention d'une corrélation significative illustrerait un *lien* entre les deux variables manipulées.

1.a) Corrélations entre inhibition et marche

Dans le but d'examiner ce lien, certains auteurs ont manipulé spécifiquement la tâche d'interférence de Stroop et une épreuve de marche. Par exemple, Hausdorff et al. (2005) ont évalué 43 sujets âgés (71.9 ± 6.4 ans) sur un test cognitif général [i.e., questionnaire Mini Mental

³² Lors d'une *tâche d'empan de chiffres*, l'expérimentateur énonce une suite composée de deux à neuf chiffres que le sujet doit par la suite répéter.

State Examination³³ - MMSE], le test de Stroop, un test de mémoire verbale (reconnu pour ne pas impliquer les fonctions exécutives) et un test de marche à allure préférentielle durant deux minutes. Leurs analyses ont mis en évidence que les performances au test de Stroop étaient négativement corrélées à certaines caractéristiques spatiotemporelles de la marche [i.e., variabilité ($r = -0.42$, $p < 0.01$) et temps moyen d'un cycle de marche ($r = -0.44$, $p < 0.01$)]. Précisément, une moindre variabilité du pas était associée à de meilleures performances au test de Stroop. Aucune corrélation entre les caractéristiques de marche et les performances au MMSE (score moyen 29 ± 1.1) et au test de mémoire verbale n'a été rapportée. Ces résultats soutiennent l'idée selon laquelle le caractère moins automatique³⁴ de la marche chez la personne âgée (Beauchet & Berrut, 2006; Beauchet et al., 2012; Laessoe et al., 2008; Woollacott & Shumway-Cook, 2002), est soutenu par l'intervention des fonctions cognitives de haut niveau pour assurer l'intégration sensorielle et le contrôle du mouvement en cours (Hausdorff et al., 2005).

Des résultats similaires ont été observés suite à une tâche d'évitement d'obstacles (Persad et al., 1995). Durant une épreuve de marche à allure préférentielle, un projecteur lumineux générerait de manière aléatoire et soudaine des obstacles à éviter le plus rapidement possible. Il a été montré que les sujets ($N = 23$, 72.7 ± 5.5 ans) souffrant de difficulté dans la tâche de Stroop étaient également ceux qui présentaient une moindre capacité à éviter ces obstacles. Dans un environnement instable, il est nécessaire de réévaluer continuellement les comportements et les stratégies mobilisés afin de s'adapter efficacement aux exigences de la situation. A l'apparition

³³ Ce questionnaire a pour objectif d'établir si le sujet souffre d'une altération du fonctionnement cognitif.

³⁴ Chez le jeune adulte, le contrôle de la marche est considéré comme automatique, c'est-à-dire assuré par un minimum de ressources cognitives (Clark, 2015). Le vieillissement engendre une augmentation du coût attentionnel associé à la marche, nécessitant ainsi un changement dans la modalité de son contrôle qui devient alors exécutif de par l'intervention de structures et de fonctions corticales (Beauchet et al., 2012).

d'un obstacle, le sujet doit adapter son profil de marche et donc inhiber le profil initialement mobilisé. L'observation d'une corrélation positive entre la capacité à inhiber et celle à éviter des obstacles soulignerait le rôle de la fonction d'inhibition dans la préservation d'un profil de marche sécurisé chez la personne âgée (Persad et al., 1995).

Par ailleurs, d'autres études se sont intéressées au défi quotidien que représente pour la personne âgée la marche en situation de double tâche [ex. marcher et porter un objet, marcher et parler] (Hausdorff et al., 2008). Pour ce faire, les capacités inhibitrices de 228 sujets (76.2 ± 4.2 ans) étaient évaluées via le test de Stroop et de Go/NoGo tandis que les caractéristiques spatiotemporelles de la marche étaient mesurées simultanément à une tâche auditive³⁵ ou de calcul mental [i.e., soustraction sérielle de 3 en 3 et de 7 en 7]. Quelle que soit la configuration de double tâche, une corrélation significative entre les performances inhibitrices et la variabilité ($r < -0.2$, $p < 0.01$) et la durée d'un cycle de marche ($r > 0.15$, $p < 0.05$) a été rapportée. Ainsi, Hausdorff et al. (2008) soutiennent que la marche en double tâche est dépendante à la fois des capacités locomotrices et inhibitrices de la personne âgée. De plus, ils rapportaient que le profil de marche des sujets présentant de faibles capacités inhibitrices était similaire à celui de sujets chuteurs précédemment rapporté dans la littérature (cf. Springer et al., 2006). Dès lors, l'idée d'une discrimination des personnes âgées chuteuses et non-chuteuses fondée sur l'évaluation de leurs capacités d'inhibition a été avancée (Hausdorff et al., 2008).

Cette hypothèse a notamment été mise à l'épreuve par Anstey et al. (2009). Ces auteurs ont montré que les performances d'inhibition, contrairement à celles de flexibilité mentale, identifiaient spécifiquement les sujets âgés chuteurs dans une logique rétrospective. Par ailleurs, ces mêmes performances inhibitrices permettaient de distinguer les sujets n'ayant subi qu'une

³⁵ Durant la configuration de double tâche marche/tâche auditive, les sujets portent un casque audio afin d'écouter une histoire et doivent compter le nombre de fois que deux mots prédéfinis sont cités.

seule chute de ceux qui en avaient subis plusieurs (Anstey et al., 2009). Par ailleurs, Springer et al. (2006) ont rapporté que le lien entre la fonction d'inhibition et la marche était particulièrement prégnant chez le chuteur. En effet, les performances inhibitrices (tests de Stroop et de Go/NoGo) étaient davantage corrélées à la variabilité de la marche chez les sujets chuteurs ($r < -0.45$, $p < 0.01$) que pour les non-chuteurs ($r < -0.38$, $p < 0.05$), confirmant que l'inhibition joue un rôle dans le risque de chute (Springer et al., 2006).

Il a été montré que les performances inhibitrices de la personne âgée sont également prédictives du risque de chute. Suite à un suivi longitudinal de deux ans, réalisé auprès de 262 sujets non-chuteurs (76.3 ± 4.3 ans), il a été observé que les sujets qui présentaient initialement de moindres performances inhibitrices [i.e., test de Stroop et Go/NoGo] étaient plus enclins à chuter (Herman et al., 2010). Cette capacité de prédiction de la chute a été confirmée par Mirelman et al. (2012). Leurs sujets non-chuteurs ($N = 256$, 76.4 ± 4.5 ans) ont réalisé une batterie de tests évaluant leurs performances inhibitrices (Stroop et Go/NoGo), attentionnelles et visuospatiales (tâche de TR nécessitant une coordination œil-main). La vitesse de marche et la variabilité du pas étaient évaluées en simple et double tâches [i.e., tâche de calcul mental]. Suite à ces évaluations initiales, les sujets étaient interrogés mensuellement pendant cinq ans sur la survenue d'une potentielle chute. Les résultats ont rapporté que les performances inhibitrices ($p < 0.05$), attentionnelles ($p < 0.01$) et de variabilité de la marche ($p < 0.05$) permettaient de prédire le risque de chute. L'évaluation des capacités d'inhibition et l'anticipation de leur déclin participeraient ainsi de manière significative à prévenir le risque et la prévalence des chutes chez la personne âgée (Mirelman et al., 2012).

Rares sont les études n'ayant pas observé ce lien entre inhibition et marche chez la personne âgée (de Bruin & Schmidt, 2010; van Iersel et al., 2008). Parmi celles-ci, Van Iersel et

al. (2008) ont évalué les performances de sujets âgés ($N = 100$, 80.6 ± 4.1 ans) au test de Stroop, de flexibilité mentale (TMT) et d'une épreuve de marche. Les résultats ont révélé que les performances d'inhibition n'étaient pas corrélées aux paramètres de marche [i.e., vitesse et variabilité spatio-temporelle de la marche], contrairement à celles de flexibilité mentale. Un argument méthodologique a été avancé pour expliquer ce résultat peu conforme à la littérature. En effet, ces auteurs précisent que les variables dépendantes utilisées pour rendre compte des performances exécutives ont été calculées d'une manière différente à celle classiquement utilisée³⁶ (Anstey et al., 2009; Ble et al., 2005; Coppin et al., 2006; Persad et al., 1995). Une fois encore est soulevée la question essentielle du choix des variables dépendantes mobilisées dans les analyses. Bien que calculées à partir des mêmes observations, ces variables sont susceptibles d'affecter significativement les résultats et de peser sur les conclusions attenantes.

1.b) Corrélation entre inhibition et initiation de pas

D'autres études se sont focalisées sur l'interaction entre inhibition et fonction motrice à travers la réalisation d'une tâche d'initiation de pas. Lord et Fitzpatrick (2001) ont par exemple testé 477 sujets âgés de 62 à 95 ans sur une tâche d'initiation de pas réactive³⁷ ainsi que sur diverses mesures exécutives, sensorimotrices et posturales. Leurs analyses ont notamment révélé que le temps d'initiation de pas était significativement corrélé à la force maximale volontaire du quadriceps et le tibialis anterior (chaque $r < -0.42$, $p < 0.01$), aux déséquilibres posturaux obtenus

³⁶ L'étude de ces variables dépendantes alternatives visait à atténuer l'influence de potentielles performances « extrêmes » (van Iersel et al., 2008). Par exemple, le score illustrant la performance au Stroop était égale à : [performance interférence – (lecture + dénomination) / (lecture + dénomination)].

³⁷ Cette tâche d'initiation de pas réactive consistait à initier un pas le plus rapidement possible sur la zone de réponse qui s'allumait. La réponse était initiée à droite, à gauche ou vers l'avant, selon la zone de réponse allumée. La performance du sujet était évaluée par le temps compris entre l'éclairage de la zone de réponse et le contact du pied sur cette zone.

face à des perturbations sensorielles spécifiques [i.e., yeux fermés, surface d'appui instable] ($r = 0.36, p < 0.01$) et aux performances au TMT ($r < -0.42, p < 0.01$). De même, les performances obtenues au test de Stroop étaient corrélées à ce temps d'action ($r = -0.36, p < 0.01$), suggérant ainsi que l'inhibition, à l'instar des facteurs susmentionnés, jouerait un rôle significatif dans la capacité d'initiation et de contrôle d'un pas rapide et précis (Lord & Fitzpatrick, 2001).

Il est reconnu que l'initiation du pas en réponse à un stimulus spécifique peut être décomposée en trois phases : 1/ la phase d'**initiation**³⁸ reflète l'intervalle de temps entre l'apparition du stimulus et le début des phénomènes posturaux dynamiques [i.e., première variation significative de la composante verticale de la force de réaction au sol (Fz)], 2/ la phase **préparatoire** correspond à la latence comprise entre la première variation significative de Fz et la levée du pied et 3/ la phase de **déplacement** renvoie au temps compris entre la levée du pied et son contact sur la zone de réponse (Dietrich et al., 1994; Melzer & Oddsson, 2004).

Basés sur le fait qu'une tâche de TR de choix nécessite à la fois la sélection de la réponse pertinente et l'inhibition de celles qui ne le sont pas (Mostofsky & Simmonds, 2008), Cohen et al. (2011) se sont intéressés à une variable dépendante relative à la deuxième étape de l'initiation du pas, à savoir : les ajustements posturaux anticipés (APA) erronés. Un APA est défini comme le changement significatif de contrôle associé au mouvement volontaire afin de générer les forces propulsives [i.e., transfert du poids sur la jambe d'appui, progression du centre de masse] nécessaires à son exécution. Calculé à partir de la Fz , un APA s'observe donc en amont de la perturbation posturale qui engendre le mouvement (Cohen et al., 2011; Massion, 1992; Melzer & al., 2007). Considéré comme le reflet de la programmation initiale d'une réponse inadaptée, un APA *erroné* représente la production d'une dynamique posturale dans le sens contraire à la

³⁸ Cette *phase d'initiation* est considérée par certains auteurs comme le TR du sujet au stimulus présenté (Sparto et al., 2013, 2014). Néanmoins, certains y préfèrent **phase préparatoire** (Schoene et al., 2014).

réponse attendue (Cohen et al., 2011). L'objectif était d'évaluer si l'augmentation du temps total d'exécution d'un pas, classiquement observée chez la personne âgée, était engendrée par une moindre inhibition de ces APA erronés. Douze jeunes adultes (26-30 ans) et 12 adultes plus âgés (50-78 ans) ont ainsi réalisé un test de Stroop et une tâche d'initiation de pas en réponse à un signal lumineux apparaissant sur la droite ou la gauche du sujet, lui indiquant ainsi la direction à suivre. Au-delà du fait que la production d'un APA erroné allongeait le temps d'exécution de la tâche chez l'ensemble des sujets, les résultats ont rapporté que le nombre d'APA erronés était trois fois plus important chez le sujet âgé. Soutenue par la corrélation chez le sujet âgé entre le nombre d'APA erronés et la performance au Stroop ($r = 0.45, p < 0.05$), l'hypothèse avancée est que l'augmentation de ce nombre d'APA erronés avec l'âge est liée à un déficit d'inhibition (Olincy et al., 1997; Potter & Grealy, 2006; Wang et al., 2013). Cette hypothèse suggérerait que les processus nécessaires à la résolution de la tâche de Stroop sont, au moins en partie, communs avec les processus requis pour produire une initiation de pas réactive (Cohen et al., 2011).

2. Apports des études mobilisant le paradigme de la double tâche³⁹

Le paradigme de la double tâche consiste à évaluer le sujet lors de deux tâches expérimentales, réalisées séparément, puis lorsqu'il les réalise simultanément (Abernethy, 1988). Une interférence entre les deux tâches est observée lorsque les contraintes de ces tâches dépassent les capacités attentionnelles du système nerveux central (Pashler, 1994).

2.a) Interaction entre inhibition et marche

Les nombreuses études « double-tâche » tendent à confirmer, d'un point de vue plus fonctionnel et écologique (Leyva et al., 2017), les liens corrélacionnels précédemment abordés.

³⁹ Dans les travaux abordés, aucune consigne quant à la priorisation d'une tâche sur l'autre n'était donnée.

Par exemple, une diminution de la vitesse de marche a été observée lorsque celle-ci est produite simultanément à un test de Stroop auditif⁴⁰, et ce, uniquement chez les sujets âgés (Plummer-D'Amato et al., 2011, 2012). De tels résultats seraient le reflet d'une capacité réduite de la personne âgée à allouer de manière flexible son attention entre les deux tâches réalisées simultanément (Shumway-Cook et al., 1997; Siu et al., 2008), surtout chez les sujets présentant de moindres capacités exécutives (Mazaheri et al., 2014).

Lors d'une épreuve de marche présentant des obstacles à éviter, Plummer-D'Amato et al. (2012) ont montré que le test de Stroop auditif interférait fortement avec la capacité à éviter un obstacle. Ce résultat a été confirmé par Potocanac et al. (2015) qui, lors d'une configuration expérimentale similaire, ont révélé une dégradation des performances au test de Stroop auditif [i.e., proportion d'erreurs chez le sujet jeune 12% vs. 35% chez le sujet âgé] lorsque l'épreuve motrice nécessitait d'enjamber des obstacles virtuels. En accord avec les observations de Hegeman et al. (2012), l'idée selon laquelle éviter un obstacle requiert l'implication de la fonction d'inhibition est avancée (Cohen et al., 2011; Hegeman et al., 2012; Potocanac et al., 2015; Yamada et al., 2011). Néanmoins, il est important de préciser que dans cette configuration de double tâche, seules les performances inhibitrices de la personne âgée étaient altérées (Potocanac et al., 2015). En effet, leurs performances motrices [i.e., longueur du pas] ne souffraient pas de la complexité expérimentale, illustrant ainsi que leurs sujets âgés favorisaient le contrôle de la tâche motrice à celui de la tâche cognitive. Interprétée comme reflétant la crainte

⁴⁰ La variante *auditive* de la tâche d'interférence de Stroop est couramment mobilisée en configuration de double tâche. Le sujet entend le mot *low* ou *high*, celui-ci étant présenté soit à une basse (112-180 Hz) ou haute (290-360 Hz) tonalité. La tâche d'interférence du Stroop auditive est observée lorsque la signification du mot présenté est en contradiction avec la tonalité administrée [ex. le mot *high* présenté avec une faible tonalité]. La réponse attendue par le sujet est d'indiquer verbalement le plus rapidement possible la tonalité sonore du mot, en inhibant sa sémantique (Cohen & Martin, 1975).

de la chute en configuration de double-tâche, cette priorité⁴¹ allouée à la tâche posturale chez la personne âgée avait déjà été décrite dans la littérature (Brauer et al., 2002; Holtzer et al., 2016; Li et al., 2001; Schrodt et al., 2004; Yogev-Seligmann et al., 2010).

2.b) Interaction entre inhibition et initiation de pas

La réalisation simultanée d'une tâche d'inhibition et d'initiation de pas a illustré que cette composante exécutive pèse sur le temps d'initiation du pas. Par exemple, Tsang et al. (2013) ont constaté que les performances inhibitrices des sujets âgés (71.9 ± 6.4 ans) au test de Stroop étaient dégradées en double tâche, contrairement à celles des sujets jeunes (âge moyen 21.9 ± 2.4 ans). Cette perturbation reflèterait une demande attentionnelle excessive associée à cette configuration pour la personne âgée (Dalton et al., 2016; Tsang et al., 2013).

De façon plus analytique, Melzer & Oddson (2004) se sont intéressés aux différentes phases de l'exécution d'un pas [i.e., initiation, préparation et déplacement; cf. page 71]. La réalisation d'un test de Stroop⁴² simultanément à une tâche d'initiation du pas amenait à un allongement significatif de la phase d'initiation [i.e., *phase n°1*]. A noter que cet allongement était largement plus important chez le sujet âgé (+108%) que chez le sujet jeune (+34%). Cette différence de performance avec l'âge illustre la quantité amoindrie de ressources attentionnelles disponibles chez le sujet âgé, engendrant ainsi un temps de traitement central plus important de la demande associée à cette configuration de double tâche (Melzer & Oddsson, 2004).

⁴¹ Lors d'une configuration de double-tâche, il est reconnu que le phénomène de *priorisation* d'une tâche sur l'autre est un phénomène dynamique (Kelly et al., 2013), davantage dépendant de la difficulté de la configuration en cours plutôt que de l'éventuelle consigne de prioriser l'une des tâches (Boisgontier et al., 2013). Il est important de souligner que dans les travaux abordés, aucune consigne quant à la priorisation d'une tâche n'était donnée.

⁴² Dans cette étude, un test de Stroop visuel était réalisé, les différents items étant projetés sur un mur situé trois mètres en face du sujet à hauteur des yeux. L'expérimentateur déclenchait l'initiation du pas par une pression manuelle appliquée au niveau des talons du sujet.

Certains auteurs ont mobilisé la tâche de Flanker (Eriksen & Eriksen, 1974) durant laquelle leurs sujets (âges moyens 21.9 vs. 72.6 ans) devaient répondre le plus rapidement possible en initiant un pas dans la direction indiquée par la flèche centrale (Uemura et al., 2016). Un allongement du temps total d'exécution du pas ainsi qu'un nombre d'APA erronés⁴³ supérieur lors des essais non-congruents [ex. ←←→←← ; présence d'un conflit inhibiteur] a ainsi été observé par rapport aux essais congruents [ex. ←←←←← ; absence de conflit]. De plus, cet allongement était d'autant plus important chez le sujet âgé. Bien que le sujet âgé présentait des performances amoindries à chaque phase de l'initiation du pas, ces trois phases n'étaient pas impactées dans une même mesure par la présence d'un conflit inhibiteur [i.e., essais non-congruents] en fonction de l'âge. En effet, les sujets âgés présentaient une sensibilité accrue à ce conflit lors de la phase préparatoire, tandis que cette sensibilité était moins importante lors de la phase d'initiation par rapport aux sujets jeunes. Ainsi, l'allongement spécifique de la phase préparatoire, reconnue pour favoriser la programmation d'APA erronés (Cohen et al., 2011), serait due à une réaction hâtive de la personne âgée face au conflit présenté. En accord avec l'observation d'une moindre capacité d'inhibition et d'une plus grande impulsivité⁴⁴ chez la personne âgée, ces auteurs soutiennent que cette stratégie de réponse inefficace exposerait la personne âgée à un risque accru de chute (Uemura et al., 2013, 2016).

L'ensemble de ces études illustre que, chez l'adulte âgé, l'altération de la fonction d'inhibition n'est pas sans conséquences sur la capacité d'initiation du pas, amenant ainsi une certaine limitation dans la production de réactions posturales efficaces.

⁴³ Rappel : les Ajustements Posturaux Anticipés (APA) interviennent dans la phase dite préparatoire (*phase n°2*) de l'initiation d'un pas.

⁴⁴ L'*impulsivité* est la tendance à prendre des décisions rapides et irréfléchies aux conséquences négatives pour l'individu. Cette impulsivité plus importante chez la personne âgée est notamment expliquée par un déficit d'inhibition (Horn et al., 2003; Morales-Vives & Vigil-Colet, 2012).

2.c) Interaction entre inhibition et fonction motrice : Innovations cliniques

De telles configurations expérimentales trouvent un écho particulièrement favorable dans le domaine clinique. Par exemple, une adaptation dite *locomotrice* du test de Stroop a été proposée afin d’appréhender les risques de démence chez la personne âgée (Perrochon et al., 2013). En effet, grâce à leur « *Walking Stroop carpet* » (Figure 4-A), ces auteurs ont mis en évidence qu’évaluer conjointement les capacités inhibitrices et motrices (vitesse, fréquence du pas) permettait d’identifier plus finement les sujets âgés présentant un stade précoce de fragilité cognitive [i.e., troubles cognitifs légers (Petersen, 2004)], contrairement à l’analyse de la marche spontanée ou aux tests neuropsychologiques classiquement utilisés en routine clinique. Toujours inspiré de la tâche d’interférence de Stroop, Perrochon et al. (2015) ont également mis au point le « *Stroop walking test* » (Figure 4-B) dans le but de détecter précocement le déclin des fonctions exécutives chez la personne âgée. Plus précisément, leur test modulait l’interférence du test de Stroop de manière originale lors d’une situation de prise de décision face à une traversée de rue régulée par un feu piéton. Leurs analyses ont mis en évidence que l’évaluation de sujets âgés ($N = 36$, 64-85 ans) permettait l’identification précoce d’une atteinte des fonctions exécutives (inhibition, flexibilité mentale). De plus, les valeurs de sensibilité (89%) et de spécificité (87%)⁴⁵ de cette tâche étaient supérieures à celles des évaluations cliniques traditionnelles, telle que la batterie rapide d’efficacité frontale (Dubois et al., 2000) ou le test de dessin de l’horloge (Royall et al., 1998) [i.e., en moyenne sensibilité 56% et spécificité 70%].

⁴⁵ En statistiques, ces paramètres renseignent sur la validité intrinsèque de la mesure considérée. La *sensibilité* renvoie à la capacité d’une mesure à produire un résultat positif lorsque l’hypothèse associée est validée, tandis que la *spécificité* renseigne sur sa capacité à produire un résultat négatif lorsque cette dernière n’est pas validée.

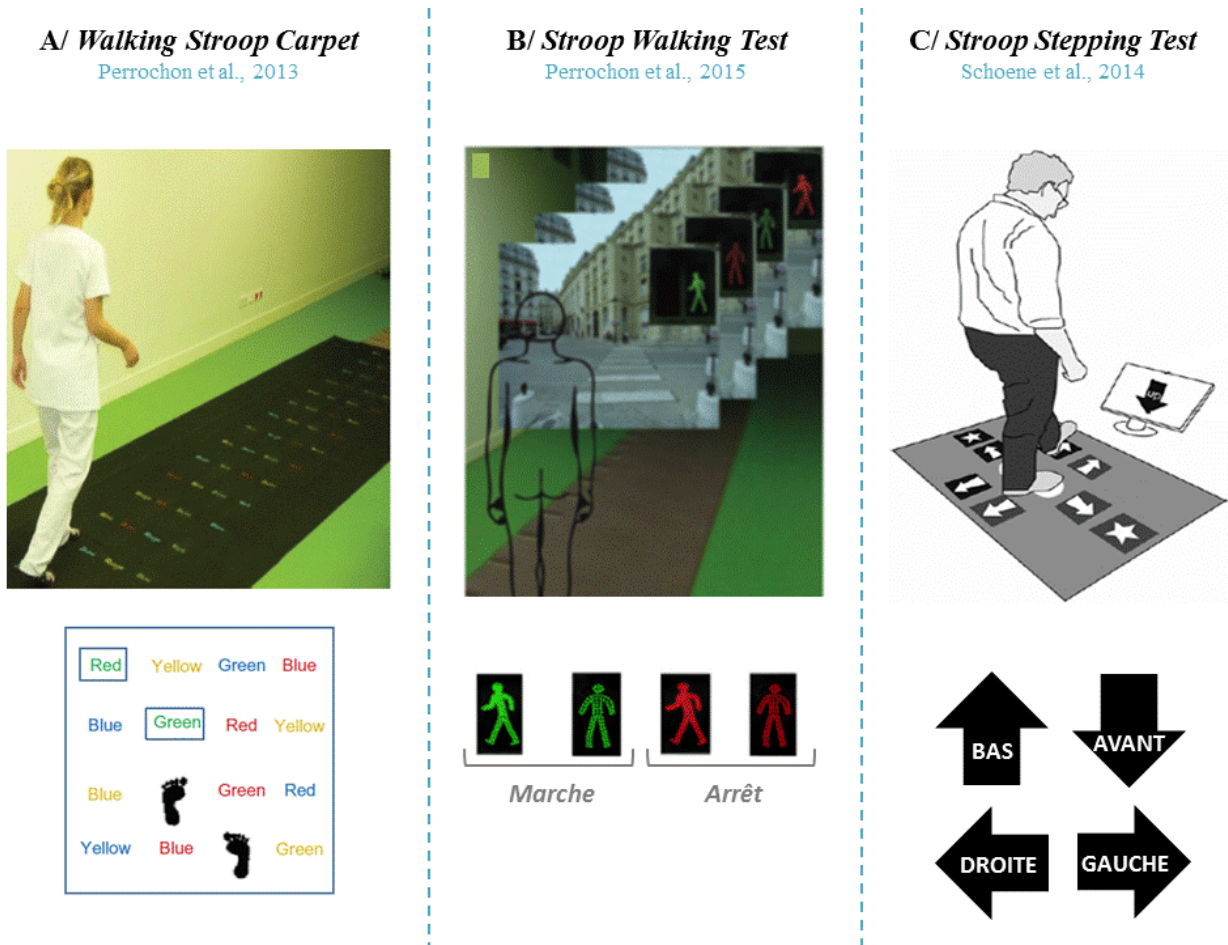


Figure 4. Illustration des différents dispositifs innovants conçus dans une logique clinique d'identification de sujets âgés présentant des troubles cognitifs (A) et exécutifs (B) ainsi que les sujets chuteurs (C).

L'identification d'atteintes cliniques par le biais de ces tâches *inhibition-motricité* ne se limite pas aux atteintes cognitives. En effet, grâce à la mise au point d'un dispositif combinant une tâche d'initiation de pas et d'inhibition, l'objectif de Schoene et al. (2014) était de discriminer les sujets âgés chuteurs des non-chuteurs. Leur tâche consistait en une initiation de pas selon des stimuli visuels spécifiques : une flèche dirigée vers le haut, le bas, la droite ou la gauche d'un écran dans laquelle était présenté le mot « avant », « arrière », « droite » ou « gauche » (Figure 4-C). L'initiation de pas la plus rapide possible devait se faire en accord avec le mot, et non avec le sens indiqué visuellement par la flèche. Ainsi, il s'avère que leur « Stroop

Stepping Test » permet une discrimination des sujets chuteurs, contrairement aux tests exécutifs [i.e., Stroop, TMT] ou aux mesures sensorielles réalisées [i.e., proprioception, sensibilité visuelle aux contrastes].

La plus-value de l'ensemble de ces dispositifs innovants dans une logique clinique de diagnostic est de rendre compte de performances cognitivo-motrices reflétant la complexité des comportements quotidiens.

V.2. Apports des travaux mobilisant le paradigme de Nassauer & Halperin (2003)

Rares sont les travaux mobilisant le paradigme de Naussauer et Halperin (2003) pour rendre compte du lien *inhibition-fonction motrice*. Pour l'instant, seules cinq études traitent de ce lien chez la personne âgée, dont deux en configuration de double tâche (Sparto et al., 2013, 2014a). Les trois autres, développées dans la partie suivante, abordaient ce lien à partir d'analyses corrélationnelles (Mendelson et al., 2010; Redfern et al., 2009; Sukits et al., 2014).

1. Apports des études corrélationnelles

Sukits et al. (2014) se sont intéressés spécifiquement à la *variabilité intra-individuelle*⁴⁶ des TR en IP ou IM ainsi qu'à celle de la marche chez le sujet âgé ($N = 71, 75.7 \pm 4$ ans). Aucune corrélation n'a été révélée entre ces variables. Ainsi, la variabilité intra-individuelle des TR lors de ces tâches d'inhibition ne semble pas être à même de caractériser le lien *cognition-fonction motrice*.

L'objectif de Redfern et al. (2009) était de déterminer la nature des relations entre les TR en IP, en IM et le niveau de stabilité posturale en fonction de l'âge. Pour ce faire, 24 sujets jeunes

⁴⁶ Cette variabilité était quantifiée par les écart-types des performances mesurées.

(25.7 ± 3.8 ans) et 24 sujets âgés (74.2 ± 4.4 ans) ont été évalués au cours d'une tâche d'IP et d'IM (Figure 2, page 35). L'équilibre orthostatique était évalué selon différentes configurations visuelles [i.e., yeux ouverts lumière allumée vs. lumière éteinte vs. support visuel en mouvement] et proprioceptives [i.e., surface d'appui stable vs. rotative]. Leurs analyses n'ont révélé aucune corrélation entre les performances d'inhibition et de contrôle postural chez le sujet jeune, quelle que soit l'inhibition ou la configuration sensorielle considérée. Par ailleurs, aucune corrélation n'a été reportée chez le sujet âgé entre IP ou IM et contrôle postural, lorsque ce dernier était évalué sur une surface d'appui stable. Pour autant, une corrélation était révélée entre l'IP et le niveau de déstabilisation en condition « *yeux ouverts lumière allumée - surface d'appui rotative* » ($r = 0.67, p < 0.001$, illustration Figure 5-A) et dans une moindre mesure dans la configuration « *yeux ouverts support visuel en mouvement - surface d'appui rotative* » ($r = 0.44, p = 0.05$). Ces corrélations illustraient que de moindres capacités d'IP étaient associées à un niveau d'instabilité posturale plus important. Un rôle spécifique de l'IP dans le processus d'intégration sensorielle de la personne âgée a ainsi été avancé (Redfern et al., 2009).

Le maintien de la posture est assuré par une régulation dynamique de l'intégration multi-sensorielle, grâce à la pondération individuelle et continue de chacune des sources d'informations sensorielles. Ce processus est appelé repondération sensorielle⁴⁷ (Nashner et al., 1982; Peterka & Loughlin, 2004). Ainsi, face à la perturbation proprioceptive engendrée par la rotation de la surface d'appui, une repondération sensorielle serait nécessaire afin de diminuer le poids des

⁴⁷ La **pondération sensorielle** est un processus dynamique qui attribue à chaque signal sensoriel une valeur (un poids) reflétant sa fiabilité. Ainsi, ce processus permet au système nerveux central d'obtenir une estimation plus fiable de la configuration multi-sensorielle présente que la fiabilité de chaque signal sensoriel pris un à un (Ernst & Bulthoff, 2004). En fonction de l'évolution de la tâche, la **repondération sensorielle** permet de réduire le poids d'un signal initialement considéré comme fiable mais devenu moins fiable et d'augmenter celui des signaux considérés comme plus adaptés (Oie et al., 2002).

informations proprioceptives erronées et de focaliser le système nerveux central sur les informations visuelles et vestibulaires (Eikema et al., 2013, 2014). Ainsi, Redfern et al. (2009) suggèrent que, chez la personne âgée, ce processus dynamique de repondération indispensable au contrôle postural nécessiterait une implication du processus d'IP en charge du traitement des informations proprioceptives erronées (Redfern et al., 2009).

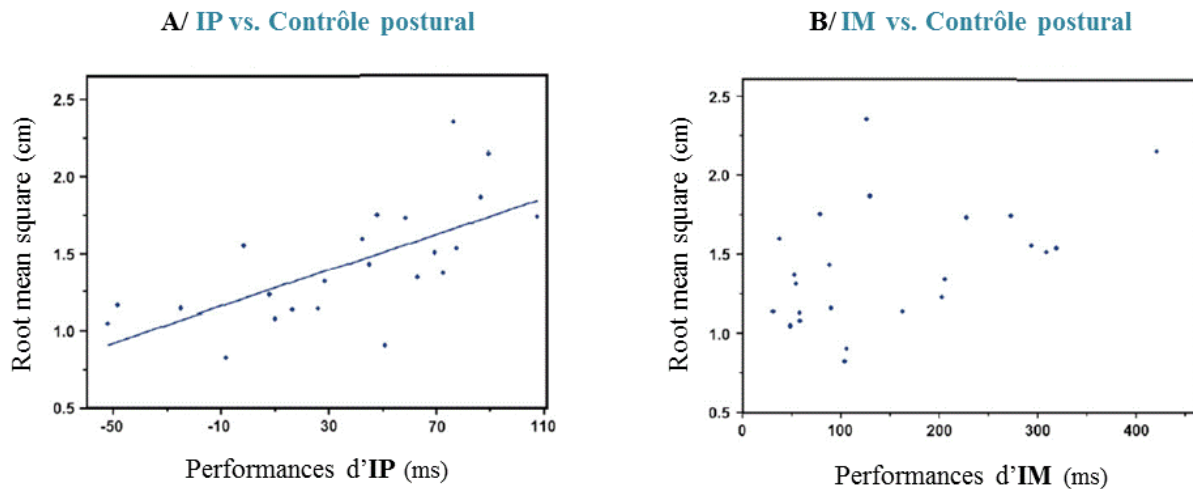


Figure 5. Illustration des performances posturales en fonction des performances A/ d'inhibition perceptive et B/ d'inhibition motrice obtenues chez le sujet âgé dans une configuration proprioceptive altérée et visuelle neutre (d'après Redfern et al., 2009).

Note. IP : inhibition perceptive ; IM : inhibition motrice.

La variable « root mean square » reflète la quantité globale de déplacement du centre de pression, ici dans l'axe antéropostérieur. Plus sa valeur est importante, plus importante est la déstabilisation posturale.

Les performances d'IP renvoient au score d' $IP_{n^{\circ}1}$ et celles d'IM au score d'IM (cf. respectivement Tableau 2A et C, page 52). Plus ces scores sont faibles, meilleure est la performance inhibitrice.

Une corrélation significative a été révélée chez le sujet âgé entre les performances d'IP et de stabilité posturale dans un contexte proprioceptif perturbé ($r = 0.67, p < 0.001$), contrairement aux performances d'IM ($r = 0.39, p > 0.1$).

En 2010, Mendelson et al. ont souhaité déterminer si les performances d'IP et d'IM étaient corrélées à des performances de TR de choix⁴⁸ réalisées simultanément à une tâche d'équilibre orthostatique selon les différentes configurations sensorielles décrites précédemment. Chez le sujet âgé (74.3 ± 4.5 ans), les performances d'IP étaient corrélées aux scores de TR⁴⁹ obtenus dans les configurations posturales « *yeux ouverts lumière allumée - surface d'appui rotative* » et « *yeux ouverts lumière allumée - surface d'appui stable* ». Une corrélation entre l'IM et le TR obtenus dans la configuration « *yeux ouverts lumière allumée - surface d'appui rotative* » était également rapportée. Aucune corrélation n'était observée chez le sujet jeune (25.8 ± 3.9 ans). Ainsi, les capacités d'IP et d'IM semblent particulièrement importantes pour le contrôle postural du sujet âgé lorsque ce dernier doit faire face à une perturbation proprioceptive (Mendelson et al., 2010). Les déficits significatifs d'IP et d'IM (Germain & Collette, 2008 ; Jennings et al., 2011) et les altérations du contrôle postural⁵⁰ engendrés par le vieillissement sont autant de facteurs qui nécessitent que la personne âgée alloue davantage de ressources attentionnelles au maintien de sa posture, d'où l'absence de corrélation significative entre ces variables chez le jeune adulte (Mendelson et al., 2010).

⁴⁸ Dans cette étude, des tâches visuelles et auditives de TR de choix ont été réalisées en position assise et en position bipodale. La configuration visuelle, consistait à répondre en appuyant sur le bouton tenu dans la main droite face à un signal lumineux de faible intensité et avec celui de la main gauche face à un signal lumineux de forte intensité. La configuration auditive présentait les mêmes consignes face à un signal sonore de faible ou de forte intensité.

⁴⁹ Les performances de TR mobilisées dans les analyses corrélationnelles abordées étaient illustrées par un score de TR global calculé à partir d'un score de TR auditif (TR auditif debout – TR auditif assis) et d'un score de TR visuel (TR visuel debout – TR visuel assis) : Score TR global = score de TR auditif + score de TR visuel.

⁵⁰ Les déficits de contrôle postural engendrés par le vieillissement ont une origine périphérique [ex. sarcopénie] (Morisawa, 1998; Pijnappels et al., 2008; Takacs et al., 2013) et centrale [ex. moindre activité des neurones dopaminergiques] (Beauchet et al., 2016; Cham et al., 2007; Furman & Redfern, 2001; Sullivan et al., 2009).

Ces corrélations spécifiques entre inhibition, déstabilisations posturales et perturbation proprioceptive observées uniquement chez le sujet âgé soutiennent certains résultats obtenus en double tâche. En effet, il a été suggéré que face à un contexte sensoriel altéré, le coût attentionnel associé à la posture est augmenté en raison d'une implication d'un contrôle inhibiteur (Redfern et al., 2001). Par ailleurs, il a été rapporté que le coût attentionnel associé au contrôle proprioceptif, évalué lors d'un test de position de cheville, était augmenté chez le sujet âgé lors de la réalisation simultanée d'un test de Stroop⁵¹ (Boisgontier et al., 2012). Néanmoins, contrairement à certains travaux (Bullock-Saxton et al., 2001; Verschueren et al., 2002a), ces auteurs n'observaient pas d'altération du contrôle proprioceptif des membres inférieurs chez le sujet âgé lorsque ce contrôle était réalisé en simple tâche (Boisgontier et al., 2012).

Par ailleurs, contrairement aux TR de la tâche d'IM, Nassauer & Halperin (2003) ont rapporté une corrélation modérée ($r = -0.35$ $p < 0.05$)⁵² entre les TR de la tâche d'IP et la performance à la tâche d'interférence du test de Stroop.

L'altération du contrôle proprioceptif de l'adulte âgé lors du test de Stroop et la corrélation entre les performances d'IP et de Stroop tendent à soutenir le lien rapporté entre IP et fonction sensorimotrice chez le sujet âgé (Mendelson et al., 2010 ; Redfern et al., 2009).

2. Apports des études mobilisant une tâche d'initiation du pas

Parmi les deux études mobilisant ce paradigme, celle de Sparto et al. (2013) analysait la production d'une initiation de pas [i.e., analyse de la phase d'initiation et de préparation⁵³]

⁵¹ Un tel résultat a été observé à la fois face aux essais congruent (ex. **ROUGE**) et non-congruents (interférence, ex. **ROUGE**) du Stroop.

⁵² Plus importante était l'interférence (moindre performance), plus longs étaient les TR de la tâche d'IP.

⁵³ Rappel : la phase d'initiation (*phase n°1*) correspond à l'intervalle de temps entre l'apparition du stimulus visuel et la première variation significative de la Fz. La phase de préparation (*phase n°2*) correspond à l'intervalle de temps entre la première variation significative de la Fz et la levée du pied.

uniquement chez des sujets âgés ($N = 40, 75 \pm 5$ ans), cette initiation étant exécutée en réponse aux stimuli visuels manipulant l'IP ou l'IM (cf. Figure 2, page 35). Selon la tâche considérée, il était demandé de répondre le plus rapidement possible en initiant un pas sur la droite ou la gauche en fonction du sens indiqué⁵⁴ par la flèche présentée ou à l'inverse⁵⁵ de celui-ci. En accord avec les travaux manipulant le test de Stroop ou la tâche de Flanker (Tsang et al., 2013 ; Uemura et al., 2016), une dégradation des performances [i.e., allongement des phases d'initiation et de préparation] lors des réponses non-congruentes a été observée, quelle que soit l'inhibition considérée (Sparto et al., 2013). Par ailleurs, évaluant l'effet de l'âge lors d'une tâche mobilisant uniquement l'IP, ces mêmes auteurs ont souligné que les performances obtenues lors des réponses non-congruentes étaient d'autant plus affectées chez le sujet âgé ($n = 70, 76 \pm 5$ ans) que chez le jeune ($n = 20, 38 \pm 11$ ans), illustrant ainsi l'augmentation liée à l'âge du coût attentionnel associé au contrôle inhibiteur (Sparto et al., 2014a).

Concernant la phase d'initiation (*phase n°1*), Sparto et al. (2013) révèlent que la différence de TR entre les réponses non-congruentes et congruentes [ex. TR essais IM_NC – TR essais M_C] était plus importante en IM (92 ms) qu'en IP (52 ms). En effet, même si les TR étaient équivalents lors des réponses congruentes, l'implication de l'IM face au conflit moteur allongeait davantage le TR par rapport à la résolution du conflit perceptif par l'IP [i.e., TR essais IP_NC : 346 ms vs. TR essais IM_NC : 398 ms; +15%]. Un traitement central plus conséquent en IM est ainsi suggéré. Néanmoins, ces auteurs s'interrogent sur ce résultat qui, au regard du

⁵⁴ Lors des réponses congruentes et non-congruentes de la tâche d'IP [notées respectivement *P_C* et *IP_NC*] et des réponses congruentes (neutres) de la tâche d'IM [notées *M_C*] la consigne était de suivre le sens indiqué par la flèche. Par exemple, si ←, alors initiation du pas vers la gauche, quel que soit le lieu d'apparition du stimulus : gauche, centre, ou droite de l'écran (cf. Figure 2, page 35).

⁵⁵ Lors des réponses non-congruentes de la tâche d'IM [notées *IM_NC*] la consigne était d'aller à l'inverse du sens indiqué par la flèche. Par exemple, si ←, alors initiation du pas vers la droite (cf. Figure 2-B², page 35).

nombre d'alternatives présentées dans la condition IP [i.e., 4 alternatives⁵⁶] et IM [i.e., 2 alternatives⁵⁷], est en contradiction avec la littérature démontrant que l'augmentation du nombre d'alternatives se traduit par un allongement du TR (Hick, 1952). Un autre argument avancé par Sparto et al. (2013) souligne que leur méthodologie, imposant la passation des différentes tâches expérimentales dans un ordre *fixe*, pourrait avoir participé à ce résultat quelque peu surprenant. En effet, tous les sujets réalisaient tout d'abord cinq tâches durant lesquelles les stimuli apparaissaient à droite ou à gauche de l'écran, puis deux tâches durant lesquelles les stimuli apparaissaient au centre de l'écran. D'autres auteurs ont également évoqué l'influence de l'ordre *fixe* de la passation de ces tâches sur les résultats (Jennings et al., 2011 ; Nassauer & Halperin, 2003), un ordre fixe reconnu pour favoriser un effet séquentiel sur les temps de réponse (Bertelson, 1963; Sanders, 1998; Welford, 1980).

Ainsi, au-delà de corroborer les résultats obtenus par les études évaluant les performances inhibitrices à travers un paradigme plus couramment mobilisé [ex. avec l'âge: moindre inhibition, TR plus lent], ces auteurs soulèvent deux points méthodologiques qui posent questions :

- la différence de quantité d'information à traiter entre les tâches manipulant l'IP et l'IM devrait se refléter sur les performances de TR,
- l'ordre de passation fixe de ces tâches pourrait influencer le profil des performances de TR.

⁵⁶ Configuration **IP** : une flèche dirigée vers la 1/ *droite* [→] ou 2/ la *gauche* [←] peut apparaître à 3/ *droite* ou à 4/ *gauche* de l'écran.

⁵⁷ Configuration **IM** : une flèche dirigée vers la 1/ *droite* [→] ou 2/ la *gauche* [←] apparaît systématiquement au centre de l'écran.

Chapitre V. En quelques mots

- *Chez la personne âgée, les fonctions exécutives assurent la coordination efficace d'une configuration de double-tâche.*
- *Les liens observés entre les performances inhibitrices et motrices chez la personne âgée seraient le témoin d'un partage des ressources sous-jacentes à leurs contrôles.*
- *Le contexte proprioceptif influence le coût attentionnel associé au contrôle postural de la personne âgée.*
- *Suite à des analyses corrélationnelles, un rôle spécifique est attribué à l'inhibition perceptive dans la régulation proprioceptive nécessaire au contrôle postural chez la personne âgée.*
- *La quantité d'information et l'ordre de passation fixe inhérents au paradigme de Nassauer & Haleprin (2003) invitent à des vérifications méthodologiques.*

VI. Résumé, enjeux et problématique

La littérature scientifique conçoit la fonction d'inhibition comme plurielle, caractérisée par différents processus spécialisés et distincts (Dempster & Corkill, 1999; Harnishfeger, 1995; Nigg, 2000). Malgré le rôle central attribué à cette fonction dans la dimension cognitive du vieillissement (Hasher & Zacks, 1988), ces processus inhibiteurs semblent différemment atteints par l'avancée en âge (Andrés et al., 2008; Collette et al., 2009b). De plus, l'interaction spécifique rapportée chez la personne âgée entre inhibition et fonction sensorimotrice ne semble pas, elle non plus, être homogène à tous les processus inhibiteurs. Par exemple, l'inhibition perceptive et l'inhibition motrice, telles qu'évaluées par les tâches conflictuelles de TR proposées par Nassauer & Halperin (2003), ne semblent pas interagir dans une même mesure avec le contrôle sensorimoteur de la personne âgée (Mendelson et al., 2010 ; Redfern et al., 2009).

Il est classiquement admis que les comportements déficients liés au vieillissement, telles qu'une stabilité posturale altérée (Dalton et al., 2016) ou une initiation de pas plus lente (Cohen et al., 2011), s'expliqueraient en partie par un déficit d'inhibition. Dans ce contexte, il a été rapporté que le contrôle postural de la personne âgée, contrairement à celui du jeune adulte, serait spécifiquement lié au processus d'inhibition perceptive (Redfern et al., 2009). En effet, l'inhibition perceptive s'est trouvée être positivement corrélée au niveau d'instabilité posturale mesuré dans un contexte proprioceptif perturbé. Dès lors, il a été suggéré que l'intégration sensorielle nécessaire aux régulations posturales impliquerait spécifiquement chez la personne âgée une inhibition perceptive des informations proprioceptives erronées.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'effet du vieillissement sur les performances d'inhibition perceptive et motrice concomitantes à la gestion d'une perturbation proprioceptive lors d'une tâche d'initiation de pas.

Au regard de la littérature, l'hypothèse principale est que l'inhibition *perceptive* participe spécifiquement à la régulation posturale de la personne âgée, lorsque celle-ci doit faire face à un contexte proprioceptif perturbé.

Le paradigme de Nassauer & Halperin (2003) a donc été utilisé afin de rendre compte des capacités spécifiques d'inhibition perceptive et motrice.

Néanmoins, certaines précautions méthodologiques soulevées dans la littérature [i.e., impact potentiel de la quantité d'information et de l'ordre fixe de passation sur les résultats] nécessitaient d'être interrogées en amont de ce questionnement central. La ***première phase expérimentale*** de ce travail de thèse était ainsi consacrée à la mise à l'épreuve de **1/** ce paradigme encore peu utilisé dans la littérature, en tant qu'outil d'évaluation des capacités d'inhibition, et de **2/** la robustesse du profil de résultats soutenant la dissociation des deux processus inhibiteurs qu'il est supposé évaluer.

Plus précisément, les trois explorations méthodologiques conduites chez le sujet jeune (< 30 ans) testaient la validité de ce paradigme en fonction de configurations expérimentales plus ou moins complexes. Une attention particulière a tout d'abord été portée sur les effets de la quantité d'information à traiter lors des tâches expérimentales et de l'influence de leur ordre de passation (fixe *vs.* randomisé) [***Etude 1***]. Par la suite, étant donné leur impact sur le temps de réaction, certaines variables liées à la position adoptée par le sujet (assis *vs.* debout), aux effecteurs de réponse (mains *vs.* pieds) et au contexte proprioceptif (sans *vs.* avec vibrations localisées) ont été

manipulées afin d'explorer la robustesse de ce paradigme et des interprétations théoriques inhérentes aux résultats observés [*Etudes 2 et Etude 3*].

Suite à cette mise à l'épreuve méthodologique, la *seconde phase expérimentale* de cette thèse explorait les interactions existant au sein du tryptique *inhibition-fonction motrice-proprioception* et de leurs potentielles évolutions liées au vieillissement. Une tâche d'initiation de pas réactive a tout d'abord été réalisée avec et sans perturbation proprioceptive par des sujets jeunes, permettant ainsi l'étude de deux variables dépendantes principales relatives au temps de *planification* et d'*exécution totale* de la réponse motrice [*Etude 4*]. Par la suite, la comparaison de sujets jeunes et de sujets âgés (> 65 ans) a permis d'aborder l'effet du vieillissement sur ces deux variables spécifiques [*Etude 5*]. Enfin, grâce à la manipulation d'une modalité de réponse « statique » et l'étude d'une variable dépendante alternative, une expérimentation complémentaire a permis de tester la robustesse des résultats obtenus chez le sujet âgé lors de cette seconde phase expérimentale [*Etude 6*].

Première phase expérimentale

Mise à l'épreuve du paradigme de Nassauer & Halperin (2003)

Etude 1: Quantité d'information et ordre de passation

Etude 2: Contraintes posturales et effecteurs de réponses

Etude 3: Perturbation des informations proprioceptives

Première phase expérimentale

I. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et quantité d'information	92
I.1. La performance : le produit d'un traitement de l'information	92
I.2. Paradigme de la chronométrie mentale	94
1. Mesure du temps de réaction	94
2. Tâche de temps de réaction simple et tâche de temps de réaction de choix	95
I.3. Quantité d'information.....	96
I.4. Quantité d'information, inhibition perceptive et inhibition motrice	97
I.5. Problématique	99
I.6. Etude 1: Effets de la quantité d'information et de l'ordre de passation dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003)	100
1. Méthode.....	100
2. Résultats	110
3. Discussion.....	114
II. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003): contraintes posturales et effecteurs de réponse.....	120
II.1. Temps de réaction, posture et effecteurs de réponse.....	120
II.2. Problématique	121
II.3. Etude 2: Effets de la contrainte posturale et de l'effecteur de réponse mobilisé dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003).....	122
1. Méthode.....	122
2. Résultats	124
3. Discussion.....	129
III. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et perturbation des informations proprioceptives.....	133
III.1 Vibrations tendineuses localisées.....	135

1. Vibration : Définition	135
2. Perturbation proprioceptive par vibrations	135
III.2 Problématique	136
III.3 Etude 3: Effets de l'application de vibrations tendineuses lors de la réalisation du paradigme de Nassauer & Halperin (2003)	138
1. Méthode.....	138
2. Résultats	140
3. Discussion.....	146
IV. Première phase expérimentale : discussion générale et conclusion	152

I. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et quantité d'information

Avant d'aborder la notion de quantité d'information, il apparaît utile de préciser le contexte théorique dans lequel elle est mobilisée et les principaux concepts sur lesquels elle repose, tels que le traitement de l'information et les travaux relatifs à la chronométrie mentale.

I.1. La performance : le produit d'un traitement de l'information

La théorie du traitement de l'information s'inscrit dans l'approche de la psychologie cognitive⁵⁸. Cette approche soutient que les comportements sont la conséquence des informations reçues de l'environnement, sélectionnées par les différents systèmes sensoriels, puis transformées par le système nerveux central afin d'en programmer l'exécution (Neisser, 1967). En d'autres termes, l'idée soutenue est que les comportements sont organisés en amont de leur déclenchement. En effet, contrairement à l'approche behavioriste qui se focalisait sur le comportement observable [i.e., *réponse*] en réponse à un stimulus spécifique (Watson, 1913), cette approche informationnelle prend en considération les mécanismes sous-jacents à ce comportement, à savoir les différents processus mis en œuvre entre le *stimulus* et la *réponse*. Pour ce faire, les travaux de psychologie cognitive se sont focalisés sur la nature et le nombre de processus cognitifs impliqués dans ce traitement de l'information, apportant ainsi une attention spécifique à « la boîte noire du cerveau » jusqu'alors inexplorée par les behavioristes.

Le traitement de l'information a été modélisé selon différentes opérations responsables d'un stade de traitement spécifique. Même si les différentes modélisations proposées au sein de la littérature diffèrent sur le nombre d'opérations mobilisées (ex. Sanders, 1990; Theios, 1975;

⁵⁸ Initiée par Georges A. Miller en 1956, l'objectif de la *psychologie cognitive* est d'identifier et de décrire l'ensemble des processus cognitifs qui sous-tendent la réalisation de toute tâche impliquant des activités mentales telles que par exemple la perception, la mémorisation ou la résolution de problème (Léger, 2016).

Welford, 1968), ces dernières peuvent se résumer en un modèle simplifié distinguant trois stades principaux de traitement, le stade : 1/ *perceptif*, responsable de l'identification du stimulus, 2/ *décisionnel*, permettant de sélectionner la réponse adaptée au stimulus présenté et 3/ *moteur*, chargé de la programmation de la réponse sélectionnée (Figure 6).

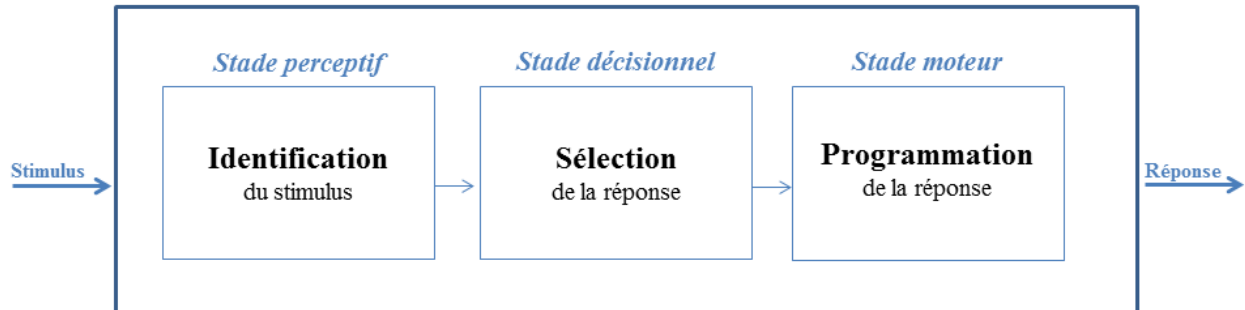


Figure 6. Illustration simplifiée des différents stades du traitement de l'information.

Note. Ces différents stades de traitement mettent en œuvre des processus dits « centraux » tandis que le stimulus (entrée) et la réponse (sortie) sont relatifs à des processus périphériques contrôlés respectivement par les systèmes sensoriels afférents et efférents.

Contrairement au modèle continu⁵⁹ proposé par McClelland (1979), une telle modélisation postule que le traitement de l'information s'effectue de manière sérielle et discrète. Chaque stade prend fin lorsque le produit de ses opérations est transmis au suivant, activant ainsi un seul stade de traitement à un instant donné. Dès lors, les durées de chaque stade sont considérées comme indépendantes.

⁵⁹ Le **modèle continu** du traitement de l'information soutient que chaque stade peut opérer simultanément grâce à la transmission continue de leurs opérations, engendrant ainsi un recouvrement temporel entre les différents stades de traitement (McClelland, 1979).

I.2. Paradigme de la chronométrie mentale

La chronométrie mentale permet l'étude de la séquence temporelle du traitement de l'information par la mesure d'un TR. Ce dernier illustre le temps nécessaire pour déclencher une réponse adaptée le plus rapidement possible suite à l'apparition d'un signal de réponse. Le TR reflète ainsi la somme temporelle de chaque stade de traitement nécessaire à l'élaboration de la réponse (Donders, 1869; Sternberg, 1969).

1. Mesure du temps de réaction

La procédure expérimentale permettant la mesure du TR est illustrée en Figure 7. Classiquement, l'apparition d'un signal dit *préparatoire* vise à alerter le sujet de l'apparition imminente d'un signal dit de *réponse*. L'intervalle de temps entre ces deux signaux est la période préparatoire. La durée de cette dernière varie généralement d'un essai à l'autre afin de limiter les stratégies d'anticipation permettant au sujet de répondre plus rapidement (Brebner & Welford, 1980). Au signal de réponse, le sujet doit répondre le plus rapidement possible selon la modalité imposée par l'expérimentateur [ex. réponse verbale, manuelle]. Le TR correspond au temps écoulé entre l'apparition de ce signal spécifique et le déclenchement manifeste de la réponse attendue.

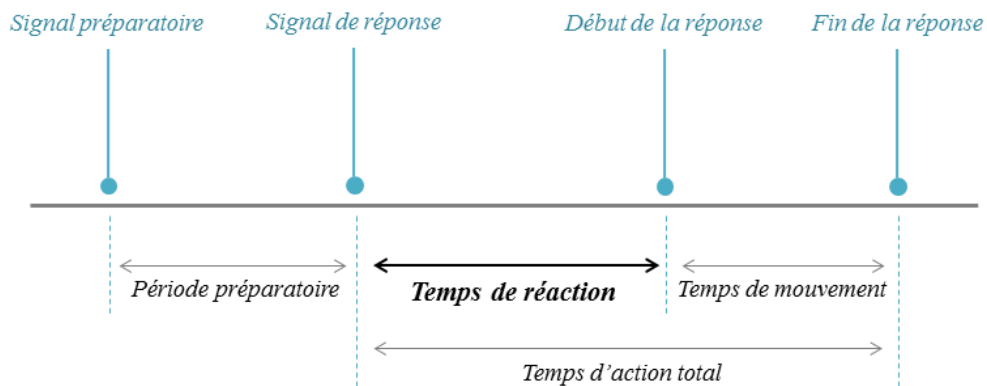


Figure 7. Illustration de la procédure chronométrique mise en place pour mesurer un temps de réaction et un temps de mouvement.

Lors d'une modalité de réponse complexe [ex. initiation d'un pas] une telle procédure permet également de mesurer un temps de mouvement. Ce dernier représente la durée s'écoulant entre le déclenchement et l'achèvement de la réponse motrice. Le *temps d'action total* (TAT) renvoie ainsi à la somme du TR et du temps de mouvement (Figure 7).

2. Tâche de temps de réaction simple et tâche de temps de réaction de choix

2.a) Temps de réaction simple

Lors d'une tâche de TR simple (TRS), le sujet est confronté à un seul signal de réponse nécessitant l'exécution d'une seule et unique réponse. Il n'y a donc aucune incertitude liée à la nature de la réponse à fournir. Seule une incertitude temporelle, liée à l'instant d'apparition du stimulus, est systématiquement présente puisque la durée de la période préparatoire (Figure 7) varie d'un essai à l'autre. Dans certains cas, sans que cela ne modifie la réponse à fournir, une incertitude spatiale peut également être présente [ex. le signal visuel peut apparaître n'importe où sur l'écran].

2.b) Temps de réaction de choix

Une tâche de TR de choix (TRC) implique plusieurs signaux de réponse, ou un signal présentant des caractéristiques qui évoluent [ex. un rond vert *vs.* un rond jaune, un carré noir apparaît à gauche *vs.* à droite de l'écran], ainsi que plusieurs réponses possibles. Chacun des signaux est associé à une réponse spécifique. Ainsi, le sujet ne connaît pas à l'avance quelle réponse il doit fournir. Dans une telle configuration, l'incertitude temporelle est accompagnée d'une incertitude événementielle [i.e., quel stimulus/quelle caractéristique va apparaître].

Il est reconnu que le TR est significativement plus rapide lors d'une tâche de TRS que lors d'une tâche de TRC (Genova et al., 2000; Girard et al., 2011; Jahanshahi et al., 1993;

Padilla-Medina et al., 2013; Pirozzolo et al., 1981; van Zomeren and Deelman, 1976). Cet allongement du TR est lié au temps nécessaire à l'analyse du signal présenté et à la sélection de la réponse qui, lors d'une tâche de TRC, ne sont pas connues à l'avance (Theios, 1975). Ainsi, le **nombre d'alternatives possibles** lors d'une tâche de TR influence le temps de traitement de l'information; c'est la quantité d'information.

I.3. Quantité d'information

En 1949, Shannon et Weaver apportent, pour la première fois, une définition quantifiée de la notion d'information. Plus précisément, la théorie de la communication qu'ils proposent conçoit l'information par rapport à la réduction d'incertitude⁶⁰ qu'elle permet et en mesure la quantité par le logarithme du nombre de choix possibles, exprimée en *binary digit*⁶¹ (bit). Cette quantité d'information, notée **I**, est quantifiée selon l'équation suivante :

$$I = \log_2 (N)$$

Où **N** représente le nombre d'alternatives possibles dans la tâche.

Dans ce cadre, Hick (1952) a montré que le temps de traitement d'un stimulus est directement fonction du nombre d'alternatives possibles, autrement dit de la quantité d'information [i.e., quantité d'incertitude]. Plus précisément, le TR est d'autant plus long que le nombre d'alternatives possibles est important (Figure 8). Cette relation entre TR et quantité d'information est modélisée par la loi de Hick selon l'équation suivante :

$$TR = a + b [\log_2 (N)]$$

Où **N** représente le nombre d'alternatives possibles et **a** et **b** des constantes empiriques relatives à l'ordonnée à l'origine (**a**) et à la pente de la droite de régression entre le TR et la quantité d'information à traiter à l'apparition du stimulus (**b**).

⁶⁰ Apporter de l'information, c'est lever de l'incertitude.

⁶¹ Représente la quantité d'information nécessaire pour diviser l'incertitude par deux.

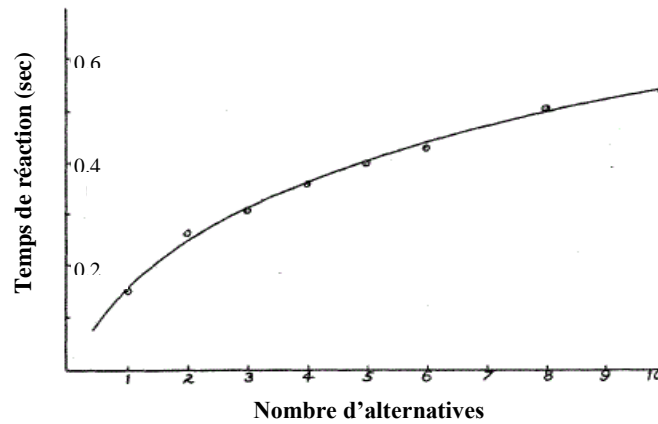


Figure 8. Illustration de la relation logarithmique entre le temps de réaction et le nombre d'alternatives lors d'une tâche de temps de réaction (d'après Hick, 1952).

Note. Les données représentées sur ce schéma sont relatives à la première expérimentation rapportée dans la publication de Hick (1952). Le schéma original fait état des données issues des trois expérimentations présentées ainsi que de celles issues du travail de Merkel (1885).

I.4. Quantité d'information, inhibition perceptive et inhibition motrice

Afin d'évaluer séparément les processus d'IP et d'IM, Naussauer et Halperin (2003) ont conçu différentes tâches faisant intervenir un conflit perceptif [i.e., évaluation de l'IP, Figure 2-A, page 35] ou un conflit moteur [i.e., évaluation de l'IM, Figure 2-B]. Néanmoins, les tâches mobilisant un conflit perceptif diffèrent de celles impliquant un conflit moteur sur le nombre d'alternatives et donc la difficulté informationnelle associée. Précisément, la tâche d'IP se caractérise par quatre alternatives : une flèche dirigée vers la *droite* [→] ou la *gauche* [←] peut apparaître à *droite* ou à *gauche* de l'écran. La tâche d'IM implique seulement deux alternatives : une flèche dirigée vers la *droite* [→] ou la *gauche* [←] apparaît systématiquement au centre de l'écran. La quantité d'information associée à ces deux tâches est donc différente, et égale à :

$$\text{Tâche IP}^{62}: I = \log_2(4) = \underline{\underline{2 \text{ bits}}} \quad \text{vs.} \quad \text{Tâche IM}: I = \log_2(2) = \underline{\underline{1 \text{ bit}}}$$

⁶² La tâche expérimentale visant à évaluer simultanément ces deux processus inhibiteurs (IP&IM, Figure 4, page 37) implique également quatre alternatives et donc une quantité d'information égale à deux bits.

Il semble alors pertinent de suggérer que cette différence de quantité d'information pourrait être à l'origine des TR plus longs classiquement rapportés dans la littérature lors de la tâche d'IP (Tableau 4).

Tableau 4. Illustration des différences de temps de réaction entre les tâches expérimentales évaluant l'inhibition perceptive et l'inhibition motrice (listées par date de publication croissante).

Année	Auteurs	TR en IP (ms)	TR en IM (ms)	Différence
2003	Nassauer & Halperin	538 (107)	482 (109)	+ 11.6 %
2008	Germain & Collette	505	422	+ 19.7 %
2010	Bedard et al.	555	507	+ 9.5 %
2010	Mendelson et al.	422 (68)	367 (39)	+ 15 %
2011	Jennings et al.	443 (68)	385 (56)	+ 15 %

Note. TR : temps de réaction; IP : inhibition perceptive [réponses non-congruentes (IP_NC) - illustrées Figure 2-A²]; IM : inhibition motrice [réponses non-congruentes (IM_NC) - illustrées Figure 2-B²]. Les temps de réaction (et écarts-types si disponibles) rapportés dans ce tableau sont relatifs à l'évaluation de sujets jeunes uniquement.

Au-delà de son impact sur les TR, l'important est de savoir si cette différence de quantité d'information à traiter lors de la tâche d'IP et d'IM influence le profil de résultat⁶³ qui a conduit Nassauer & Halperin (2003) et Germain & Collette (2008) à soutenir l'idée de processus inhibiteurs distincts chez le jeune adulte.

⁶³ Pour rappel, ce profil de résultat se caractérise par un effet du conflit perceptif et du conflit moteur (augmentation du TR en présence de chaque type de conflit) et une absence d'interaction entre ces conflits.

I.5. Problématique

Au vu de ces premiers éléments, il semblait important d'interroger la validité du paradigme proposé par Nassauer & Halperin (2003) et des apports théoriques associés. L'objectif principal de cette première étude était donc **d'évaluer si le design expérimental proposé, impliquant différentes quantités d'information en fonction de l'inhibition évaluée, était à l'origine de la dissociation des processus d'IP et d'IM soutenue chez le sujet jeune**. Pour ce faire, un paradigme alternatif faisant intervenir la même quantité d'information [i.e., $I = 1$ bit] dans chaque tâche de TR a été mis en place. L'hypothèse soutenue est que la réduction de la quantité d'information dans les tâches impliquant un conflit perceptif (tâches IP et IP&IM) conduit à la suppression de ce conflit initialement engendré par la quantité d'information égale à 2 bits. Une reconsidération de la distinction de ces processus inhibiteurs et de la validité du paradigme est ainsi envisagée.

Par ailleurs, une seconde considération méthodologique a été portée au design de ce paradigme. Classiquement, les tâches de TR ont été mobilisées dans un ordre de passation fixe, où l'IP était systématiquement évaluée avant l'IM (Bebard et al., 2010; Germain & Colette, 2008; Jennings et al., 2011; Mendelson et al., 2010; Mohammad et al., 2010; Nassauer & Halperin, 2003; Redfern et al., 2009; Schulz et al., 2005), afin de permettre une évaluation valide des différences individuelles (Jennings et al., 2011). Or, de nombreux travaux ont montré qu'un ordre *fixe* pouvait favoriser un effet séquentiel sur les TR, les premières séries de TR réalisées étant significativement plus lentes que les dernières (Kirby, 1976; Laming, 1968; Sanders, 1998; Soetens, 1998). Cet ordre fixe pourrait ainsi être envisagé comme un autre biais méthodologique à l'origine des TR classiquement plus longs en condition d'IP (Tableau 4).

L'objectif secondaire était donc d'évaluer si l'ordre de passation *fixe* influençait le profil de résultats ayant conduit les travaux princeps à soutenir une dissociation des processus d'IP et d'IM chez le sujet jeune. L'hypothèse soutenue était que l'ordre fixe constituait un biais méthodologique, impactant les résultats rapportés dans la littérature, notamment les TR plus importants lors de la tâche d'IP.

I.6. Etude 1: Effets de la quantité d'information et de l'ordre de passation dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003)

1. Méthode

1.a) Sujets

Soixante jeunes adultes⁶⁴ (44 hommes et 16 femmes, 44 droitiers et 16 gauchers, âge moyen $20,9 \pm 1,8$ ans) ont pris part volontairement à cette étude. Aucun d'entre eux n'était familier aux tâches de TR réalisées.

1.b) Tâches de temps de réaction

Conformément aux travaux princeps (Germain & Collette, 2008 ; Nassauer & Halperin, 2003), le sujet était soumis à différentes tâches de TRS et de TRC présentant, ou non, un conflit perceptif et/ou moteur. L'ensemble de ces tâches a été réalisé sous le logiciel PsyScope, permettant la mesure du TR du sujet (Cohen et al., 1993).

Le sujet était assis devant un ordinateur placé à une distance d'un mètre et tenait dans chacune de ses mains une manette. Il lui était demandé de répondre correctement le plus rapidement possible à l'apparition du signal de réponse [i.e., rectangle ou flèche]. Un signal

⁶⁴ Les sujets jeunes (< 30 ans) ayant participé aux expérimentations menées dans cette thèse étaient tous étudiants à l'Université de Nantes (UFR STAPS, informatique, psychologie, faculté de médecine, école d'orthophonie).

préparatoire [i.e., +] apparaissait systématiquement au centre de l'écran pendant 500 millisecondes (*ms*), et déclenchait une période préparatoire d'une durée comprise entre 1000 et 2500 *ms*. Le signal de réponse restait affiché à l'écran jusqu'à la réponse du sujet, c'est-à-dire pendant la durée du TR (Figure 9). En plus de ces signaux de réponse spécifiques, le sujet était confronté à des signaux *pièges* [i.e., **○**] auxquels il ne devait pas répondre afin de limiter les stratégies d'anticipation (Mendelson et al., 2010). L'intervalle entre les essais variait aléatoirement entre 2500 et 3500 *ms* après la réponse du sujet.

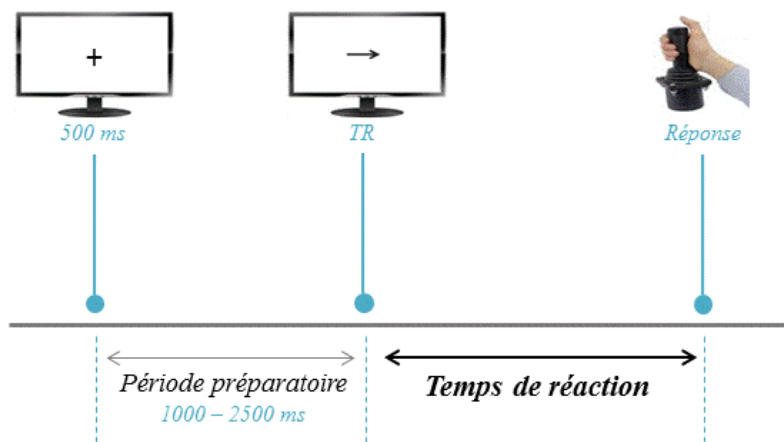


Figure 9. Illustration de la procédure chronométrique mise en place pour évaluer le temps de réaction (TR) en réponse au conflit perceptif et/ou moteur.

Aucun feedback n'était donné au sujet suite à sa réponse, même en cas d'erreur. Avant chaque tâche, l'expérimentateur communiquait oralement les consignes, le sujet étant systématiquement informé qu'il devait répondre correctement et le plus rapidement possible à l'apparition du signal de réponse en appuyant sur le bouton presseur adapté à la consigne donnée.

→ *Tâche de TRS*

Au début de l'expérimentation, le sujet réalisait une tâche de TRS. L'objectif était de répondre le plus rapidement possible à l'apparition d'un rectangle noir, en appuyant sur le bouton presseur d'une manette tenue dans la main dominante.

→ *Tâche de TRC à deux éventualités (TRC₂)*

Durant cette tâche de TRC₂, le signal de réponse [i.e., rectangle noir] apparaissait à droite ou à gauche de l'écran. Tenant une manette dans chacune des mains, il était demandé au sujet de répondre le plus rapidement possible en appuyant sur le bouton presseur correspondant au lieu l'apparition du stimulus.

→ *Evaluation de l'IP : tâche de conflit perceptif*

Durant cette tâche, le signal de réponse [i.e., une flèche] apparaissait à droite ou à gauche de l'écran. Cette flèche pouvait être orientée soit vers la droite, soit vers la gauche. Une telle configuration permettait d'obtenir deux types d'essais: les essais dits congruents (**P_C**) et non-congruents (**IP_NC**). Quel que soit l'essai P_C ou IP_NC réalisé, **la consigne était de répondre en fonction du sens indiqué par la flèche**, et non en fonction de son lieu d'apparition.

Lors des essais congruents, le lieu d'apparition de la flèche était en accord avec le sens qu'elle indiquait [ex. si la flèche apparaît à *gauche* de l'écran dirigée vers la *gauche*, alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *gauche*] (Figure 10-A). Aucun conflit perceptif n'était manipulé lors de ces essais P_C; le choix de la réponse dépendant du seul traitement de l'incertitude spatiale (apparition à droite ou à gauche de l'écran).

Lors des essais non-congruents, le lieu d'apparition de la flèche était en opposition avec le sens qu'elle indiquait [ex. si la flèche apparaît à *droite* de l'écran dirigée vers la *gauche*, alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *gauche*]. Un conflit apparaissait donc entre la localisation spatiale de la flèche et le sens indiqué. La résolution de ce conflit perceptif lors des essais IP_NC nécessitait l'inhibition de la dimension non pertinente du stimulus, à savoir son lieu d'apparition (Figure 10-B).



Figure 10. Illustration d'un essai congruent (P_C) et non-congruent (IP_NC) de la tâche de conflit perceptif, ainsi que les réponses attendues.

→ *Evaluation de l'IM : tâche de conflit moteur*

Durant ces tâches la flèche apparaissait systématiquement au centre de l'écran. Le sujet était également confronté à deux types d'essais : congruents (M_C) et non-congruents (IM_NC).

Lors des essais congruents, le sujet répondait en fonction du sens indiqué par la flèche [ex. si la flèche apparaît au centre de l'écran dirigée vers la droite, alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *droite*] (Figure 11-A). Étant donné qu'aucun contrôle inhibiteur n'était nécessaire dans cette configuration (compatibilité stimulus-réponse, absence d'incertitude spatiale), ces essais M_C étaient considérés comme neutres.

Lors des essais non-congruents, **la consigne était de répondre à l'inverse du sens indiqué par la flèche** [ex. si la flèche est dirigée vers la droite alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *gauche*]. Ainsi, un conflit apparaissait entre le sens de la flèche et la réponse attendue. La résolution de ce conflit dit moteur⁶⁵ nécessitait l'inhibition de la sélection de la réponse prédominante mais inappropriée à la tâche (illustration Figure 11-B).

⁶⁵ Pour rappel, ce conflit moteur généré par l'incompatibilité entre le stimulus présenté et la réponse attendue impacterait le stade *décisionnel* de la chaîne du traitement de l'information [i.e., sélection de la réponse appropriée].



Figure 11. Illustration d'un essai congruent (M_C) et non-congruent (IM_NC) de la tâche de conflit moteur et les réponses attendues.

→ *Evaluation simultanée de l'IP et de l'IM : Tâche combinant les conflits perceptif et moteur [IP&IM]*

Durant cette tâche, la flèche apparaissait à droite ou à gauche de l'écran, tel qu'observé durant celle mesurant l'IP. Le sujet était confronté à deux types d'essais : congruents (P&IM_C) et non-congruents (IP&IM_NC). Quel que soit l'essai, **la consigne était de répondre à l'inverse du sens indiqué par la flèche**, indépendamment de son lieu d'apparition.

Lors des essais congruents, seul un conflit « moteur » apparaissait (IM) puisque la localisation de la flèche était en accord avec le sens qu'elle indiquait [ex. si la flèche apparaît à *gauche* de l'écran dirigée vers la *gauche*, alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *droite*] (illustration Figure 12-A). Tandis que lors des essais non-congruents, le sujet devait à la fois inhiber la localisation de la flèche (IP) et la sélection de la réponse dominante (IM) [ex. si la flèche apparaît à *droite* de l'écran dirigée vers la *gauche*, alors le sujet doit répondre en appuyant sur la manette *droite*] (illustration Figure 12-B).

1.d) Procédure

Les soixante sujets ont été répartis aléatoirement dans un des quatre groupes indépendants étudiés dans cette expérimentation (voir Tableau 5 la description de chaque groupe, page 112).

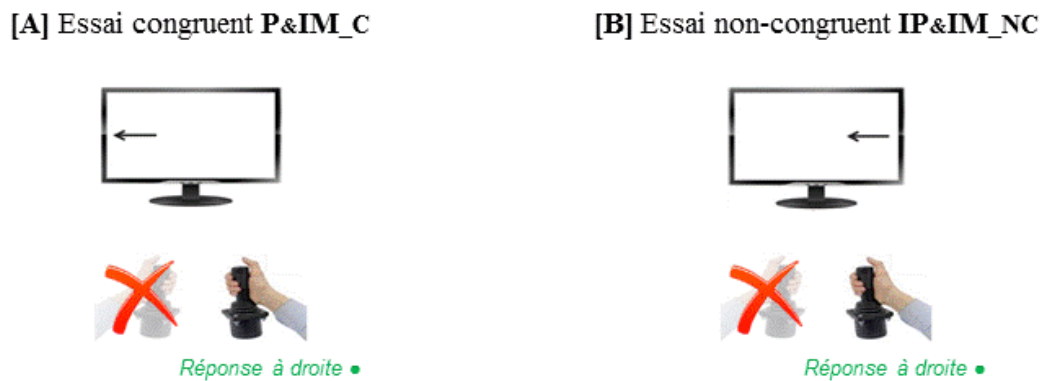


Figure 12. Illustration d'un essai congruent (P&IM_C) et non-congruent (IP&IM_NC) de la tâche de conflits combinés ainsi que des réponses attendues.

Chaque groupe était soumis à un protocole expérimental particulier. Néanmoins, il est important de noter que les tâches de TRS et de TRC₂ étaient identiques pour les quatre groupes (20 essais). Egalement, la tâche neutre [i.e., composée des essais M_C] et la tâche de conflit moteur [i.e., composée des essais IM_NC] présentaient exactement le même contenu quel que soit le groupe, à savoir 24 essais (dont 4 pièges) mobilisant une quantité d'information égale à 1 bit.

Le groupe noté « $G_{I=2_F}$ » réalisait à l'identique les tâches proposées dans le paradigme de Nassauer & Halperin (Figure 13). Chaque sujet réalisait ainsi les tâches suivantes dans le même ordre fixe :

- 1/ tâche **neutre** (i.e., essais M_C uniquement) [I = 1 bit],
- 2/ tâche de **TRC₂**,
- 3/ tâche de **conflit perceptif** (comprenant 20 essais P_C et 20 essais IP_NC présentés dans la même tâche, ainsi que 8 essais pièges) [*ici* I = 2 bits],
- 4/ tâche **neutre** (i.e., essais M_C uniquement) [I = 1 bit],
- 5/ tâche de **conflit moteur** (i.e., essais IM_NC uniquement) [I = 1 bit],

6/ tâche de **conflits combinés** (comprenant 20 essais P&IM_C et 20 essais IP&IM_NC présentés dans la même tâche, ainsi que 8 essais pièges) [*ici I = 2 bits*].

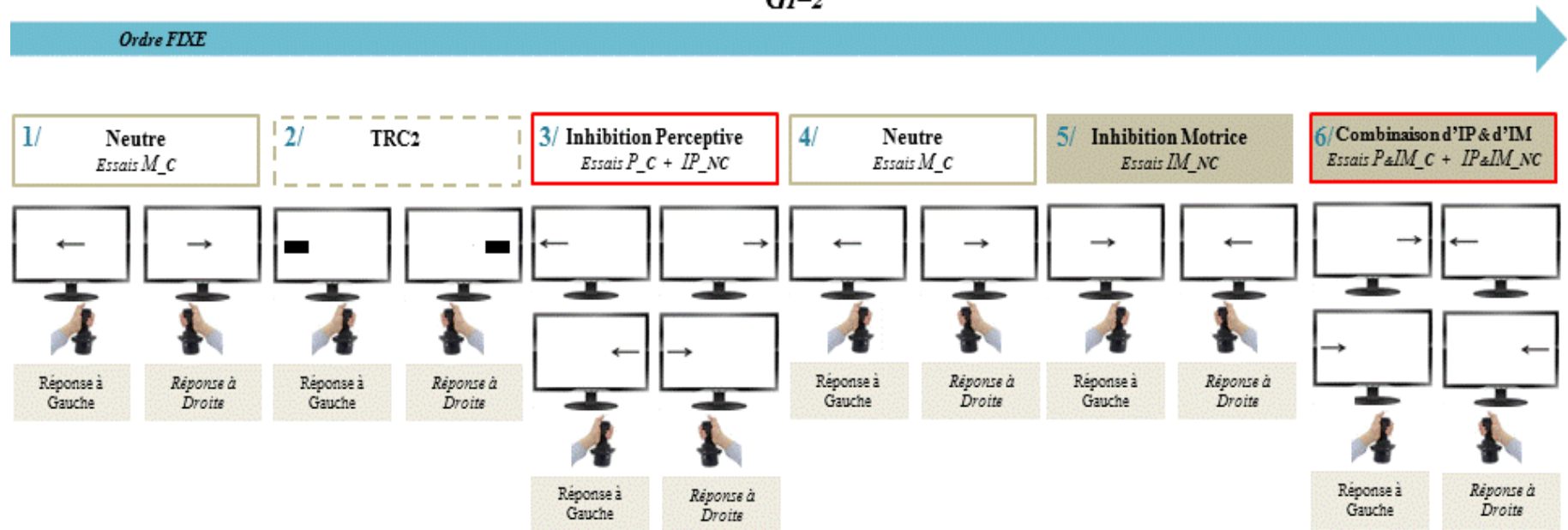
Le $G_{I=1}_F$ réalisait un paradigme alternatif impliquant dans chaque tâche la même quantité d'information [**I = 1 bit**] ainsi que le même nombre d'essais [i.e., 24 dont 4 essais pièges] (Figure 14). Pour ce faire, les essais IP_NC et IP&IM_NC étaient réalisés indépendamment de leur version congruente [i.e., P_C et P&IM_C]. Chaque sujet réalisait donc dans un ordre fixe les tâches suivantes :

- 1/ tâche **neutre** (i.e., essais M_C uniquement),
- 2/ tâche de **TRC₂**,
- 3/ tâche d'**incertitude spatiale** (i.e., essais P_C uniquement),
- 4/ tâche de **conflit perceptif** (i.e., essais IP_NC uniquement),
- 5/ tâche **neutre** (i.e., essais M_C uniquement),
- 6/ tâche de **conflit moteur** (i.e., essais IM_NC uniquement),
- 7/ tâche de **conflit moteur et d'incertitude spatiale** (i.e., essais P&IM_C uniquement),
- 8/ tâche de **conflits combinés** (i.e., essais IP&IM_NC uniquement).

Le $G_{I=2}_R$ réalisait les tâches originales (Figure 13) dans un ordre randomisé. Ainsi, le sujet réalisait un ensemble de tâches expérimentales présentant une quantité d'information [i.e., I = 1 ou 2 bit(s)] et un nombre d'essais différents [i.e., 24 ou 48 essais] en fonction de l'inhibition évaluée.

Enfin, le $G_{I=1}_R$ réalisait les tâches du paradigme alternatif [i.e., même quantité d'information (I = 1 bit) et nombre d'essais (24 essais), Figure 14] dans un ordre randomisé.

$G_{I=2}$

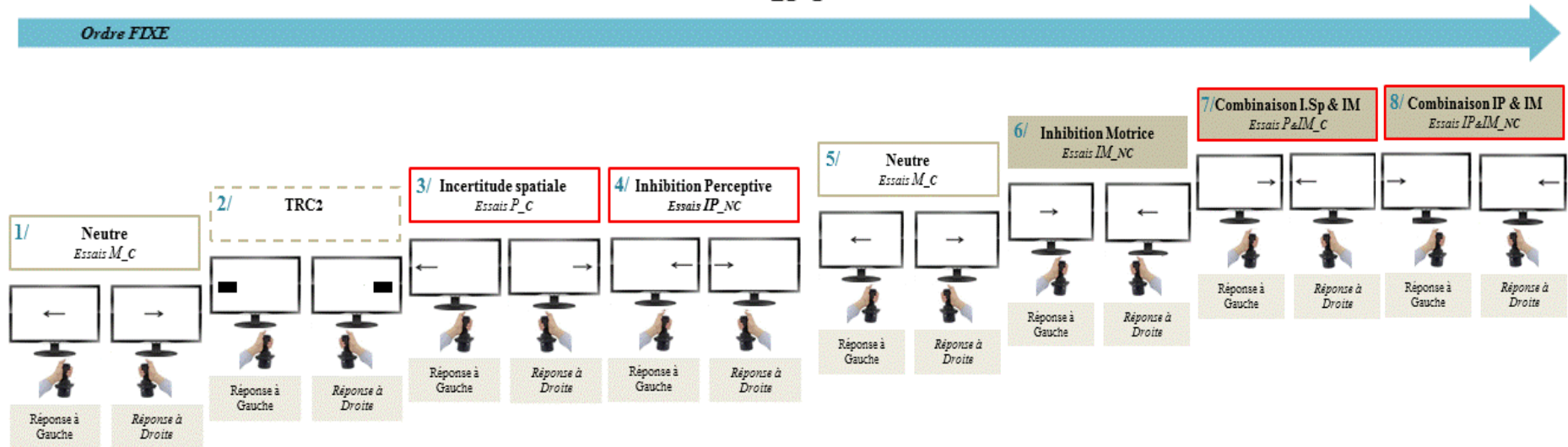


- I = 1 bit** / 24 essais / Absence de conflit
- I = 2 bits** / 48 essais / Présence d'un conflit perceptif en NC
- I = 1 bit** / 24 essais / Présence d'un conflit moteur
- I = 2 bits** / 48 essais / Présence simultanée d'un conflit perceptif et moteur en NC

Figure 13. Illustration des tâches expérimentales proposées par Nassauer & Halperin(2003), réalisées dans un ordre fixe ($G_{I=2}_F$) ou randomisé ($G_{I=2}_R$).

Note. IP : Inhibition perceptive; IM : inhibition motrice; C : congruent (absence d'inhibition); NC : non-congruent (présence d'inhibition).

$G_{I=1}$



- I = 1 bit** / 24 essais / Absence de conflit
- I = 1 bit** / 24 essais / Présence d'un conflit perceptif en NC
- I = 1 bit** / 24 essais / Présence d'un conflit moteur
- I = 1 bit** / 24 essais / Présence simultanée d'un conflit perceptif et moteur en NC

Figure 14. Illustration des tâches expérimentales alternative, réalisées dans un ordre fixe ($G_{I=1}_F$) ou randomisé ($G_{I=1}_R$).

Note. IP : Inhibition perceptive; IM : inhibition motrice; C : congruent (absence d'inhibition); NC : non-congruent (présence d'inhibition); I.Sp : incertitude spatiale.

1.e) Analyse des données

Les analyses statistiques ont été réalisées sur les TR médians afin de réduire l'influence d'éventuelles données extrêmes (Jennings et al., 2011). Pour les tâches impliquant le conflit perceptif, seuls les essais **non-congruents** [i.e., IP_NC et IP&IM_NC] ont été inclus dans les analyses (Germain & Colette, 2008). Enfin, les TR issus de mauvaises réponses ont été exclus des analyses.

*1.e) Analyses statistiques*⁶⁶

Afin d'établir si les quatre groupes évalués étaient comparables, une analyse de variance (ANOVA) impliquant le facteur *Groupe* (4: $G_{I=2}_F$ vs. $G_{I=1}_F$ vs. $G_{I=2}_R$ vs. $G_{I=1}_R$) a été réalisée sur les données d'âge, ainsi que sur les TRS et TRC₂.

Par la suite, à l'instar des travaux princeps (Germain & Collette, 2008; Nassauer & Halperin, 2003), une ANOVA impliquant les facteurs *Conflit perceptif* (2: Absence vs. Présence) et *Conflit moteur* (2: Absence vs. Présence) a été réalisée pour chacun des groupes.

→ L'absence de *Conflit Perceptif* est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais **M_C** et **IM_NC** tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais **IP_NC** et **IP&IM_NC**. Pour rappel, l'Annexe 1 illustre ces notions d'absence vs. présence de *Conflit perceptif* (cf. page 226).

→ L'absence de *Conflit Moteur* est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais **M_C** et **IP_NC** tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais **IM_NC** et **IP&IM_NC** (cf. Illustration Annexe 1, page 226).

⁶⁶ Pour l'ensemble des analyses statistiques réalisées dans ce travail de thèse, le seuil de significativité était fixé à 0.05 et des analyses post-hoc de Bonferroni ont été réalisées si applicables. La taille de l'effet expérimental était rapportée par la valeur du partial eta square ($\rho\eta^2$). Cette valeur était considérée comme très importante à partir de $\rho\eta^2 > 0.14$ (Cohen, 1988). Egalement, les distributions de TR ont systématiquement passé le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov.

2. Résultats

L'ensemble des TR obtenus sont résumés dans le Tableau 5 (moyenne \pm écart-type (ET), en ms). Aucune différence n'a été observée entre les groupes en ce qui concerne l'âge, le TRS et le TRC₂ des sujets (chaque $p > 0.4$).

Le pourcentage de réponses correctes obtenu est très important, quels que soit la tâche ou le groupe considéré (proportion moyenne de réponses correctes $98.7\% \pm 0.4\%$, représentant une moyenne de 1.6 erreurs pour 120 essais - hors TRS et TRC₂).

2.a) Ordre fixe

G_{I=2}F : L'ANOVA a révélé un effet principal *Conflit Perceptif* ($F_{(1,14)} = 90.9$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.87$; TR absence: 349.01 ± 39.6 vs. TR présence: 432.78 ± 52.2 ms, +24%) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,14)} = 20.7$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.60$; 373.16 ± 61.9 vs. 408.65 ± 58.6 ms, +10%) soulignant des TR plus courts en absence de conflit (Figure 15-A). L'interaction entre ces deux facteurs n'était pas significative ($p > 0.1$).

G_{I=1}F : Aucun effet principal n'a été révélé par cette analyse (chaque $p > 0.2$). Néanmoins, une interaction *Conflit Perceptif* * *Conflit Moteur* ($F_{(1,14)} = 13.2$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.51$) a mis en évidence que les TR obtenus lors des essais IM_NC étaient significativement plus longs que ceux obtenus lors des essais M_C ($p < 0.01$, +14%). Aucune différence entre les essais IP_NC et IP&IM_NC n'a été mise en évidence (Tableau 5, Figure 15-B).

2.b) Ordre randomisé

G_{I=2}R : Les effets principaux du facteur *Conflit Perceptif* ($F_{(1,14)} = 98.5$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.86$; 353.82 ± 56.6 vs. 423.47 ± 49.8 ms, +20%) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,14)} = 18.1$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.56$; 364.82 ± 53.5 vs. 412.07 ± 64.9 ms, +13%) ont été observés, rapportant de moindres

performances de TR en présence de conflit (Figure 15-C). A noter que l'interaction entre ces conflits n'était pas significative ($p > 0.2$).

$G_{I=I}R$: L'analyse a révélé un effet du facteur *Conflit Perceptif* ($F_{(1,14)} = 5.7$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.29$) où les TR obtenus en présence du conflit perceptif étaient plus importants qu'en l'absence de ce dernier (349.32 ± 49.9 vs. 379.97 ± 84.5 ms, +9%) (Figure 14-D). Aucun effet du facteur *Conflit Moteur* ($p > 0.2$) n'a été observé. L'interaction *Conflit Perceptif * Conflit Moteur* ($F_{(1,14)} = 5.9$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.29$) a révélé des TR significativement plus courts lors des essais neutres [i.e., M_C] par rapport aux essais IP_NC, IM_NC et IP&IM_NC (chaque $p < 0.05$). Aucune différence entre les essais IM_NC et IP&IM_NC n'a été rapportée (Tableau 5, Figure 15-D).

Tableau 5. Caractéristiques des sujets et temps de réaction médians obtenus lors de chaque tâche expérimentale pour les quatre groupes indépendants étudiés. Données exprimées en moyenne (écart-type)

	<u>Ordre Fixe</u>		<u>Ordre Randomisé</u>	
	$G_{I=2_F}$ <i>n = 15</i>	$G_{I=1_F}$ <i>n = 15</i>	$G_{I=2_R}$ <i>n = 15</i>	$G_{I=1_R}$ <i>n = 15</i>
Caractéristiques des sujets				
Homme/Femme	11/4	11/4	11/4	11/4
Age (ans) •	20.9 (1.7)	20.6 (1.1)	21.2 (1.9)	20.6 (1.9)
Taille (cm) •	174.4 (9.2)	175.6 (8.3)	173.3 (8.9)	174.7 (6.8)
Poids (kg) •	67.9 (9.8)	71.3 (11.6)	66.3 (8.8)	67.1 (6.1)
Temps de réaction médian pour chaque tâche (ms)				
Temps réaction simple •	214.52 (22.4)	212.77 (22)	213.90 (26.2)	207.68 (12.2)
Temps réaction de choix •	255.85 (22.4)	258.97 (22.1)	263.07 (23.2)	261.60 (17.6)
Neutre - Essais M_C	323.94 (23.8)	322.80 (37.7)	324.90 (28.9)	321.33 (22.4)
Conflit perceptif - Essais IP_NC	422.45 (46.6)	357.40 (45.2)	404.73 (41.1)	380.43 (46.5)
Conflit moteur - Essais IM_NC	374.26 (36.5)	367.10 (48.2)	381.93 (63.8)	377.30 (54.7)
Conflits combinés - Essais IP&IM_NC	443.09 (57.1)	338.7 (65.4)	442.21 (51.9)	379.97 (90.7)

Note. $G_{I=2}$: réalisation des tâches originales [I = 1 ou 2 bit(s)]; $G_{I=1}$: réalisation des tâches alternatives impliquant la même quantité d'information à traiter [I = 1 bit]; M_C : essais sans conflit; IP: inhibition perceptive; NC : non-congruent; IM: inhibition motrice; IP&IM: combinaison d'un conflit perceptif et moteur. • Aucune différence entre les groupes concernant ces critères de base.

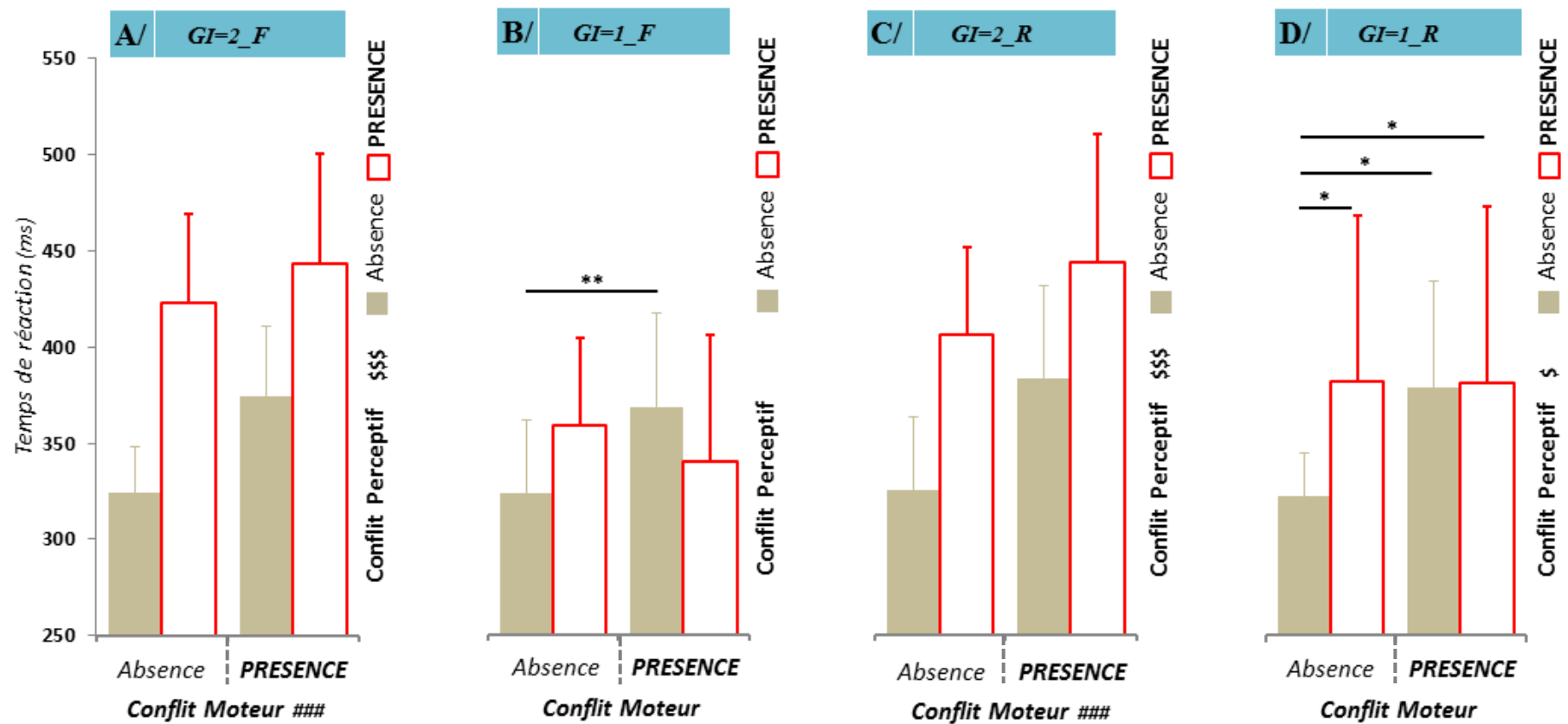


Figure 15. Illustration des temps de réaction en fonction du conflit pour chaque groupe évalué.

Note. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; \$: effet principal Conflit Perceptif ($p < 0.05$); \$\$\$: effet principal Conflit Perceptif ($p < 0.001$); ###: effet principal Conflit Moteur; $G_{I=2}$: réalisation des tâches originales [$I = 1$ ou 2 bit(s)]; $G_{I=1}$: réalisation des tâches alternatives [$I = 1$ bit]; F: ordre de passation fixe; R: ordre de passation randomisé.

3. Discussion

La première partie de cette discussion sera consacrée à l'effet de la quantité d'information à traiter sur la robustesse du paradigme mobilisé, les processus inhibiteurs évalués et leur potentielle distinction. La seconde partie sera centrée sur l'effet de l'ordre de passation des différentes tâches et sur les précautions méthodologiques associées à ces passations.

3.a) Quantité d'information : $I = 2$ bits vs. $I = 1$ bit

L'objectif principal de cette première étude était de mettre à l'épreuve la validité du paradigme de Nassauer & Halperin (2003), ainsi que l'interprétation associée au profil de résultats obtenu, au regard de la quantité d'information à traiter. La difficulté informationnelle des tâches de TR a été homogénéisée lors de l'évaluation spécifique de l'IP et de l'IM. Plus précisément, lors des tâches d'IP et d'IP&IM, la quantité d'information a été réduite de moitié afin de traiter, à l'instar de celle évaluant l'IM, seulement un bit d'information. Conformément à l'hypothèse formulée, l'évaluation de l'IP et l'IP&IM dans une telle configuration [i.e., $I = 1$ bit] a eu pour effet de supprimer le conflit perceptif nécessaire à leur évaluation. En effet, les résultats statistiques du $G_{I=1}_F$ n'ont pas mis en évidence d'effets des conflits manipulés, rendant ainsi difficile la question et l'interprétation de processus inhibiteurs potentiellement distincts. L'interaction obtenue souligne par ailleurs qu'aucun traitement inhibiteur n'était nécessaire pour exécuter la version alternative de ce paradigme, à l'exception des essais IM_NC⁶⁷. En effet, aucune différence n'a été observée entre les essais neutres (M_C) et les essais IP_NC et IP&IM_NC. Dans la configuration alternative, les essais IP_NC et IP&IM_NC ne permettent donc pas d'évaluer les capacités inhibitrices des sujets.

⁶⁷ *Rappel* : présentant uniquement un conflit *moteur*, les essais IM_NC étaient identiques dans chacun des groupes [$I=1$ bit]. Ces essais n'avaient donc pas subi de modification dans le groupe $G_{I=1}_F$, contrairement aux essais IP_NC et IP&IM_NC.

A l'instar des études antérieures menées chez le jeune adulte (Germain & Collette, 2008; Schulz et al, 2005), les résultats obtenus lors de la réalisation du protocole original ($G_{I=2_F}$) semblent soutenir l'idée que ce paradigme permet d'évaluer « *deux processus supposés distincts du contrôle inhibiteur* » (Nassauer & Halperin, 2003, p.29). Deux interprétations peuvent être associées à ces résultats ($G_{I=2_F}$ vs. $G_{I=1_F}$).

D'un côté, les présents résultats pourraient questionner la validité du paradigme original et, de fait, l'interprétation en faveur d'une dissociation des processus inhibiteurs engagés. Il est possible de suggérer que les résultats rapportés dans la littérature, confirmés par ceux du $G_{I=2_F}$, soient la simple conséquence d'une difficulté informationnelle différente entre les tâches expérimentales [$I = 1$ vs. 2 bit(s)]. Dès lors, l'effet additif observé sur les TR illustrerait uniquement la différence du nombre d'alternatives entre les tâches, reconnu pour affecter la charge informationnelle et donc le TR (Hick, 1952). Une telle interprétation suggèrerait que les résultats des travaux princeps ne seraient pas le témoin de processus inhibiteurs distincts mais révélateur d'un traitement informationnel accru sur les TR. La différence de TR classiquement observée entre IP et IM (cf. Tableau 4, page 98) illustrerait ainsi la différence d'investissement attentionnel à fournir lors des tâches expérimentales permettant leur évaluation. L'IP et l'IM pourraient alors tout aussi bien renvoyer à un même processus de contrôle inhibiteur, caractérisé par une charge attentionnelle plus importante lors de la tâche d'IP, plus complexe [$I = 2$ bits]. Ce biais « informationnel » inviterait donc à considérer sous un angle différent les résultats et les interprétations avancées par les travaux antérieurs (Germain & Colette, 2008 ; Jennings et al., 2011 ; Mendelson et al, 2010 ; Nassauer & Halperin, 2003 ; Redfern et al., 2009 ; Schulz et al., 2005). Néanmoins, les apports de cette étude ne permettent pas de soutenir spécifiquement l'une de ces deux hypothèses [i.e., processus unique vs. processus distincts].

D'un autre côté, les TR du $G_{I=1}_F$ révèlent que cette version alternative a ses limites, et pourraient ainsi soutenir l'utilisation du paradigme original pour l'évaluation des capacités d'inhibition. En effet, ces résultats illustrent que les tâches alternatives visant à évaluer l'IP au cours des essais IP_NC et IP_&IM_NC n'ont pas permis de produire le conflit perceptif nécessaire à son implication. Il s'avère que les essais IP_&IM_NC n'étaient également pas en mesure de produire le conflit moteur nécessaire à l'implication de l'IM, contrairement aux essais IM_NC qui n'avaient subi aucune modification. Dès lors, en impliquant seulement un bit d'information à traiter, ces tâches alternatives ne permettent pas d'évaluer les capacités inhibitrices puisque aucun conflit cognitif ne doit être résolu. Par conséquent, la potentielle distinction des processus inhibiteurs considérés ne peut être testée puisque ce paradigme alternatif ne nécessite pas l'intervention de l'inhibition. Une telle interprétation suggérerait donc que l'évaluation spécifique de l'IP et de l'IM nécessite des tâches mobilisant différentes quantités d'information, malgré les impacts que cela suppose sur les TR.

3.b) *Ordre de passation*

L'objectif secondaire de cette étude était de tester l'effet de l'ordre de passation fixe ou randomisé des différentes tâches expérimentales mobilisées afin de vérifier la robustesse des résultats princeps soumis à la manipulation de cette variable. Les performances de TR du $G_{I=2}_R$ étaient identiques à celles du $G_{I=2}_F$. En effet, lors de la réalisation des tâches originales, la résolution simultanée des deux types de conflit (tâche IP_&IM) conduisait à une augmentation additive des TR, quel que soit l'ordre de passation (Figure 15-A et C). Concernant leur version alternative, les résultats du $G_{I=1}_R$ ont rapporté que même dans un ordre randomisé, ces tâches alternatives n'étaient pas en mesure de reproduire l'ensemble des conflits cognitifs souhaités puisque aucun effet du facteur « *conflit moteur* » n'a été observé.

D'un point de vue méthodologique, ces résultats soulignent que l'ordre imposé des passations n'affecte pas le profil des résultats et ne peut donc pas, contrairement à l'hypothèse formulée, être considéré comme un biais méthodologique. Concernant les études réalisées dans le cadre de cette thèse, un ordre de passation randomisé a été systématiquement employé. Ce choix a été motivé par le fait que certains protocoles présentés ci-après nécessitaient une répétition importante de ces tâches [ex. le sujet réalise six fois chaque tâche dans l'étude 3, quatre fois dans l'étude 5], répétition reconnue pour développer les effets d'apprentissage et favoriser une amélioration des TR au fil de passations (Duncan, 1977).

Pour conclure, l'exploration de ces deux premiers questionnements méthodologiques tend à confirmer la validité de ce paradigme, en tant qu'outil pertinent d'évaluation des capacités inhibitrices, et la solidité des résultats rapportés dans la littérature. En effet, le design expérimental original conçu en terme de quantité d'information semble être un prérequis nécessaire pour induire les conflits cognitifs attendus et, de fait, évaluer les processus en charge de leur résolution. Par ailleurs, il s'avère que l'ordre de passation des tâches expérimentales n'a aucun impact sur le profil des résultats. Ainsi, l'ordre initialement imposé ne peut être considéré comme un prérequis méthodologique essentiel à la mobilisation de ce paradigme.

Il est important de souligner que les travaux princeps ont validé ce paradigme dans un contexte de réalisation relativement simple : le sujet était assis et répondait en appuyant sur les touches réponses d'un clavier d'ordinateur. D'autres travaux ont choisi de le mobiliser dans une configuration dynamique, lorsque le sujet, debout, initiait un pas pour répondre (Huppert et al., 2013; Sparto et al., 2013, 2014a). Or, il est reconnu que les effecteurs de réponses (Darbutas et al., 2013; Grrishma et al., 2013; Holroyd et al., 1998; Montés-Micó et al., 2000; Simonen et al.,

1995) et la posture adoptée lors d'une tâche de TR impactent les performances (Lajoie et al., 1993, 1996; Roerdink et al., 2011; Teasdale et al., 1993; Vuillerme et al., 2002).

Ainsi, l'hypothèse de processus inhibiteurs distincts, impliqués à différents stades de la chaîne du traitement de l'information, reste discutable au regard du niveau de complexité posturale imposée au sujet.

Etude 1. En quelques mots

- *La différence de quantité d'information entre les tâches de TR est nécessaire à l'évaluation des capacités inhibitrices.*



Si $I = 1$ bit dans chaque tâche, il n'y a pas de conflit cognitif à résoudre donc pas d'inhibition à mesurer.

- *L'ordre de passation des tâches n'affecte pas le profil des performances de TR.*

Et maintenant : Quels sont les effets de la posture et des effecteurs de réponse mobilisés sur les TR issus des tâches expérimentales de Nassauer & Halperin (2003) ?

II. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003): contraintes posturales et effecteurs de réponse

II.1. Temps de réaction, posture et effecteurs de réponse

De nombreux facteurs influencent la durée d'un TR, à commencer par les facteurs propres au sujet, tels que l'âge (Deary et al., 2006; Tun & Lachman, 2008; Yang et al., 2015), le genre (Der & Deary, 2006; Fozard et al., 1994; Jain et al., 2015) ou encore l'état de fatigue (van den Berg & Neely, 2006; Cote et al., 2009; Sabzi, 2012). Par exemple, l'étude de Der et Deary (2006) menée auprès de 7130 sujets âgés de 18 à 94 ans a mis en évidence que le vieillissement se caractérisait par une augmentation du TR. Ils précisait que le TRS moyen évoluait vers 50 ans, tandis que le TRC moyen évoluait linéairement tout au long de la vie. De plus, il a été rapporté que les femmes présentaient en moyenne un TR plus lent que les hommes (Der & Deary, 2006).

Il est également possible d'identifier des facteurs expérimentaux liées aux tâches mobilisées, tels que le nombre d'alternatives (Hick, 1952), la nature du stimulus [ex. TR stimulus auditif < TR stimulus visuel (Elliott, 1968; Jain et al., 2015; Redfern et al., 2002; Shelton & Kumar, 2010)] ou encore l'effecteur de réponse mobilisé (Chan & Chan, 2011; Darbutas et al., 2013; Pfister et al., 2014) et la contrainte posturale [ex. assis, debout sur 2 ou 1 pied(s), marche (Marsh & Geel, 2000; Teasdale & Simoneau, 2001; Vuillerme & Nougier, 2004)]. Concernant ce dernier facteur, il a été rapporté que les TR obtenus lorsque le sujet se tenait debout étaient significativement allongés par rapport à ceux obtenus lorsqu'il se tenait assis, illustrant ainsi que le contrôle de la posture orthostatique n'est pas un processus entièrement automatique (Lajoie et al., 1993, 1996; Marsh & Geel, 2000; Vuillerme & Nougier, 2004; Vuillerme et al., 2002). En effet, l'augmentation du TR révélait un coût attentionnel associé à la tâche plus important lorsque le sujet se tenait debout.

Par ailleurs, il est reconnu que lorsque le sujet répond manuellement face à un stimulus spécifique, il présente un TR plus rapide par rapport à une réponse podale. Par exemple, Pfister et al. (2014) ont comparé le TRS de sujets jeunes ($N = 47$, 20-35 ans, position assise) en fonction de l'effecteur de réponse utilisé [i.e., main vs. pied dominant]. Les TRS obtenus étaient significativement plus longs lors des réponses podales ($p < 0.05$; TRS manuel : 311 ± 52 ms vs. TRS podale : 321.5 ± 51 ms). Cette différence de TR serait liée à la distance de conduction nerveuse plus importante entre le cerveau et le pied par rapport à celle entre le cerveau et la main (Grrishma et al., 2013; Misra et al., 1985; Pfister et al., 2014). Certains auteurs suggèrent qu'elle serait également le reflet d'une dextérité plus importante des doigts par rapport à celle des chevilles (Chan & Chan, 2010).

Les rares travaux ayant évalué l'effet de la posture (assis vs. debout) sur les performances inhibitrices rapportent que la charge attentionnelle liée à l'inhibition n'impacte pas spécifiquement le coût attentionnel associé à la tâche réalisée en position debout. En effet, aucune différence entre les performances d'inhibition évaluées assise et debout n'a été rapportée chez le jeune adulte [cf. test de Stroop (Russell et al., 2016; Schraefel et al., 2012), test de Stop signal (Redfern et al., 2001)]. Par ailleurs, aucune étude ne semble avoir évalué l'impact de l'effecteur de réponse (main vs. pied) sur les performances inhibitrices.

II.2. Problématique

Le paradigme de Nassauer & Halperin (2003) ayant été validé dans un contexte expérimental spécifique [i.e., position assise, réponses manuelles], il semblait intéressant de tester si les résultats princeps et leurs interprétations résistaient à la manipulation de contraintes posturales plus coûteuses en attention [i.e., position : debout, effecteurs de réponses: pieds]. L'objectif de cette deuxième étude était donc d'évaluer si la configuration posturale dans

laquelle était placé le sujet influençait la validité⁶⁸ de ce paradigme ainsi que le profil des résultats initiaux⁶⁹. Pour ce faire, différentes configurations posturales ont été testées : assis vs. debout et réponses manuelles vs. podales. Bien qu'une augmentation du coût attentionnel associé à la complexité posturale était attendue, aucun impact spécifique sur l'inhibition n'était envisagé.

II.3. Etude 2: Effets de la contrainte posturale et de l'effecteur de réponse mobilisé dans le paradigme de Nassauer & Halperin (2003)

1. Méthode

1.a) Sujets

Quatre-vingt-huit sujets (68 hommes et 20 femmes, 64 droitiers et 24 gauchers, âge moyen $20,7 \pm 1,4$ ans) ont pris part volontairement à cette étude. Aucun sujet n'avait une expérience préalable des différentes tâches de TR proposées.

1.b) Tâches de temps de réaction

Les tâches de TRS et de TRC (TRC₂ et tâches avec ou sans conflit perceptif et/ou moteur) réalisées lors de cette expérimentation présentaient les mêmes caractéristiques que les tâches originales décrites lors de l'étude 1, à l'exception des effecteurs de réponses mobilisés décrits ci-après (cf. pages 101-105). Pour rappel, les tâches évaluant l'IP et l'IP&IM étaient composées de 48 essais, dont huit essais pièges [●]. Chacune des quatre alternatives [i.e., → apparaissant à droite ou à gauche de l'écran et ← apparaissant à droite ou à gauche de l'écran] était représentée

⁶⁸ Est-ce que ce paradigme permet l'évaluation de capacités inhibitrices, quelle que soit la configuration posturale adoptée ?

⁶⁹ Le profil de résultats initial fait référence à l'observation d'un effet des conflits manipulés ainsi que l'absence d'interaction entre ces conflits. L'interprétation en faveur d'une dissociation des processus d'IP et de d'IM est adossée à ce profil de résultats (cf. Nassauer & Halperin, 2003).

10 fois dans un ordre randomisé. L'évaluation de l'IM se faisait par l'intermédiaire de 24 essais, dont quatre essais pièges [●], chaque alternative [i.e., ← ou → apparaissant au centre de l'écran] étant représentée 10 fois dans un ordre randomisé.

1.c) Procédure

Les 80 sujets ont été répartis aléatoirement au sein de quatre groupes indépendants (voir Tableau 6 pour les caractéristiques de ces groupes). Le protocole original de Nassauer & Halperin (2003) (Figure 13, page 107) a été réalisé par chacun de ces groupes selon les configurations suivantes :

- Position : *Assise* - effecteurs de réponse : *Mains* // **Groupe noté : *G_A-M***
- Position : *Assise* - effecteurs de réponse : *Pieds* // **Groupe noté : *G_A-P***
- Position : *Debout* - effecteurs de réponse : *Mains* // **Groupe noté : *G_D-M***
- Position : *Debout* - effecteurs de réponse : *Pieds* // **Groupe noté : *G_D-P***

Les réponses manuelles consistaient en une pression du pouce droit ou gauche sur le bouton presseur tenu dans chacune des mains, tandis que les réponses podales consistaient en une levée du talon droit ou du talon gauche, ces derniers étant placés sur un bouton presseur adapté. Chaque tâche de TR durait entre 1' et 2'30 et était suivie par 90 secondes de repos. Le sujet était systématiquement informé de répondre le plus rapidement possible à l'apparition du signal de réponse en accord avec la consigne donnée.

1.d) Analyse des données et statistiques

L'analyse des données était identique à celle de l'étude 1 (cf. page 109), avec le TR médian comme variable dépendante principale. Une ANOVA impliquant le facteur *Groupe* (4: *G_A-M* vs. *G_A-P* vs. *G_D-M* vs. *G_D-P*) a été réalisée sur les caractéristiques de base (âge, taille, poids) ainsi que sur les performances de TRS et de TRC₂.

Pour chacun des quatre groupes, une ANOVA individuelle impliquant le facteur *Conflit perceptif*⁷⁰ (2: Absence vs. Présence) et *Conflit moteur*⁷¹ (2: Absence vs. Présence) a été réalisée.

Par la suite, afin de comparer l'effet de la charge attentionnelle associée à la configuration posturale sur le TR, une ANOVA globale impliquant les facteurs *Groupe* (4: *G_A-M* vs. *G_A-P* vs. *G_D-M* vs. *G_D-P*), *Conflit perceptif* (2: Absence vs. Présence) et *Conflit moteur* (2: Absence vs. Présence) a été réalisée.

2. Résultats

L'ensemble des TR obtenus sont résumés dans le tableau 6. Le pourcentage de réponses correctes est important (moyenne de réponses correctes $96.8\% \pm 2.1\%$, soit une moyenne de 3.8 erreurs pour 120 essais - hors TRS et TRC₂) quels que soient la tâche ou le groupe.





2.a) ANOVAs individuelles

Quel que soit le groupe, les ANOVA ont mis en évidence le même profil de résultats. Globalement, un effet principal du facteur *Conflit Perceptif* (chaque $p < 0.001$) et du facteur *Conflit Moteur* (chaque $p < 0.001$) ont été rapportés, où les sujets présentaient des TR plus rapides en absence de conflit. Aucune interaction entre ces deux facteurs n'a été observée (chaque $p > 0.1$). L'ensemble des résultats statistiques est illustré par la figure 16 et résumé dans le tableau 7.

⁷⁰ Pour rappel, l'absence de *Conflit Perceptif* est évaluée par la moyenne des TR obtenus aux essais M_C et IM_NC tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus aux essais IP_NC et IP&IM_NC (cf. illustration Annexe 1, page 226).

⁷¹ Pour rappel, l'absence de *Conflit Moteur* est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais M_C et IP_NC tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais IM_NC et IP&IM_NC (cf. Annexe 1, page 226).

Tableau 6. Caractéristiques des sujets et temps de réaction médians de chaque tâche expérimentale pour les quatre groupes indépendants étudiés. Données exprimées en moyenne (écart-type).

	 G_A-M <i>n = 22</i>	 G_A-P <i>n = 22</i>	 G_D-M <i>n = 22</i>	 G_D-P <i>n = 22</i>
Caractéristiques des sujets				
Homme/Femme	17/5	17 /5	17/5	17/5
Age (ans) [•]	21.4 (2.2)	20.9 (1.5)	20.7 (1.1)	20.2 (0.8)
Taille (cm) [•]	175.5 (10.7)	174.6 (7.6)	174.3 (8.1)	175.7 (7.4)
Poids (kg) [•]	71.8 (8.9)	72.1 (10.9)	69.8 (8.9)	70.1 (10.2)
Temps de réaction médian pour chaque tâche (ms)				
Temps réaction simple	213.75 (25.9)	304.23 (23.7)	240.11 (57.4)	358.54 (30.4)
Temps réaction de choix	261.07 (26.5)	346.84 (26.9)	273.78 (39.2)	413.05 (41)
Neutre - Essais M_C	325.61 (30.2)	406.07 (27.4)	340.53 (49.4)	474.09 (37.9)
Conflit perceptif - Essais IP_NC	401.38 (29.2)	498.25 (49.9)	416.14 (54.8)	571.70 (52.5)
Conflit moteur - Essais IM_NC	383.18 (58.5)	450.41 (30)	389.68 (58.9)	526.43 (46.9)
Conflits combinés - Essais IP_&IM_NC	443.31 (47.3)	520.68 (50.6)	458.14 (49.6)	605.55 (74.6)

Note. G_A : réalisation des tâches en position assise; G_D : réalisation des tâches en position debout; M : réponses manuelles; P : réponses podales; M_C : essais sans conflit; IP: inhibition perceptive; NC : non-congruent; IM: inhibition motrice; IP_&IM: combinaison d'un conflit perceptif et moteur. [•] Absence de différence entre les groupes concernant ces critères (chaque $p > 0.6$).

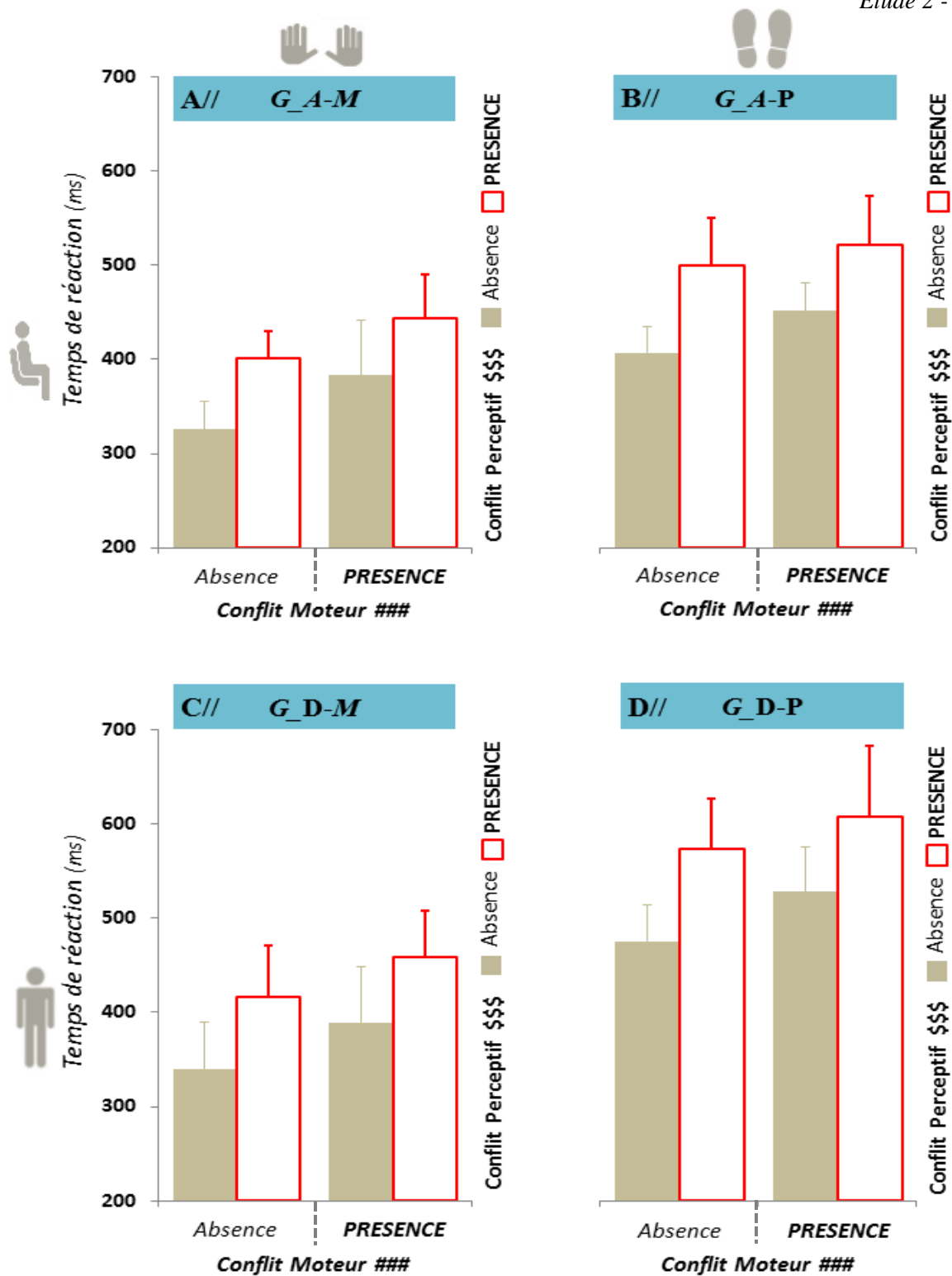


Figure 16. Illustration des temps de réaction en fonction du type de conflit pour les quatre groupes évalués.

Note. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. \$\$\$: effet principal Conflit Perceptif ($p < 0.001$); ###: effet principal Conflit Moteur ($p < 0.001$); G_A: réalisation des tâches en position assise; G_D: réalisation des tâches en position debout; M: réponses manuelles; P: réponses podales.

Tableau 7. Résultats statistiques obtenus par chacune des analyses de variance en fonction du groupe.

<i>Effet</i>	$F_{(1,21)}$	<i>p</i>	$p\eta^2$	Valeurs moyennes \pm ET (ms) absence vs. présence de conflit	Différence
<i>G_A-M</i>					
<i>Perceptif</i>	138.5	< 0.001	0.87	354.40 \pm 54.4 vs. 422.34 \pm 44.2	+19%
<i>Moteur</i>	39.9	< 0.001	0.65	363.49 \pm 48.3 vs. 413.24 \pm 60.7	+13%
<i>Interaction</i>	2.4	> 0.13	0.10	-	-
<i>G_A-P</i>					
<i>Perceptif</i>	118.6	< 0.001	0.85	428.24 \pm 36.2 vs. 509.46 \pm 50.9	+19%
<i>Moteur</i>	29.9	< 0.001	0.56	452.16 \pm 61.3 vs. 485.54 \pm 54.4	+7%
<i>Interaction</i>	2.1	> 0.15	0.09	-	-
<i>G_D-M</i>					
<i>Perceptif</i>	173.6	< 0.001	0.89	365.10 \pm 59.2 vs. 437.14 \pm 55.9	+20%
<i>Moteur</i>	64.1	< 0.001	0.75	378.33 \pm 64.2 vs. 423.91 \pm 64.1	+12%
<i>Interaction</i>	0.4	> 0.51	0.02	-	-
<i>G_D-P</i>					
<i>Perceptif</i>	114.4	< 0.001	0.85	500.26 \pm 49.8 vs. 588.62 \pm 65.9	+17%
<i>Moteur</i>	25.2	< 0.001	0.55	522.89 \pm 66.9 vs. 565.99 \pm 73.4	+8%
<i>Interaction</i>	1.5	> 0.24	0.07	-	-

Note. ET : écart-type; *G_A* : réalisation des tâches en position assise; *G_D* : réalisation des tâches en position debout; M : réponses manuelles; *P* : réponses podales.

2.b) ANOVAs globales

→ Tâches de TRS et de TRC₂

Les ANOVAs réalisées ont mis en évidence un effet du facteur *Groupe* (TRS : $F_{(3,63)} = 66.6, p < 0.001, p\eta^2 = 0.76$; TRC₂ : $F_{(3,63)} = 66.6, p < 0.001, p\eta^2 = 0.76$). Cet effet soulignait que les TR obtenus par le *G_A-M* étaient statistiquement équivalents à ceux du *G_D-M* (TRS : $p > 0.1$; TRC₂ : $p > 0.9$). Par rapport à ces deux groupes, un allongement des TR était observé pour le *G_A-P* (chaque $p < 0.001$) et d'autant plus pour le *G_D-P* (chaque $p < 0.001$).

→ *Tâches de conflit*

L'analyse a rapporté un effet du facteur *Groupe* ($F_{(3,84)} = 72.4, p < 0.001, \eta^2 = 0.72$). Illustré en Figure 17, cet effet a également mis en évidence des TR statistiquement équivalents pour le *G_A-M* et *G_D-M* ($p = 1$) mais inférieurs à ceux du *G_A-P* (chaque $p < 0.001$), eux-mêmes inférieurs à ceux du *G_D-P* (chaque $p < 0.001$).

Les effets principaux relatifs aux facteurs *Conflit Perceptif* ($F_{(1,84)} = 512.2, p < 0.001, \eta^2 = 0.86$) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,84)} = 140.9, p < 0.001, \eta^2 = 0.63$) ont également été rapportés, illustrant des TR plus longs en présence de conflit [i.e., tâche de conflit perceptif : 412.1 ± 49.9 vs. 489.5 ± 54.2 ms, +19% ; tâche de conflit moteur : 429.2 ± 60.2 vs. 472.2 ± 63.1 ms, +10%]. Aucune interaction n'a été révélée (chaque $p > 0.2$), à l'exception de l'interaction *Conflit Perceptif * Conflit Moteur* ($F_{(1,84)} = 5.9, p < 0.05, \eta^2 = 0.06$). Cette dernière a mis en évidence que chaque modalité (absence vs. présence de conflit) était statistiquement différente (chaque $p < 0.001$) et a illustré une augmentation sous-additive⁷² du TR lors de la résolution simultanée des deux types de conflits. Enfin, l'interaction *Groupe * Conflit Perceptif * Conflit Moteur* n'était pas significative ($p > 0.8$).

⁷² Plus précisément, le TR en configuration neutre : 387 ms, TR en IP : 471 ms, TR en IM : 437 ms, TR en IP&IM : 507 ms. Donc le coût associé au *Conflit Perceptif* est de 84 ms ($471 - 387$ ms), celui associé au *Conflit Moteur* est de 50 ms ($437 - 387$ ms), tandis que le coût associé à la combinaison de ces deux types de conflits est de 120 ms ($507 - 387$ ms). Ces résultats illustrent ainsi un effet sous-additif ($84 + 50 = 134$ ms vs. 120 ms).

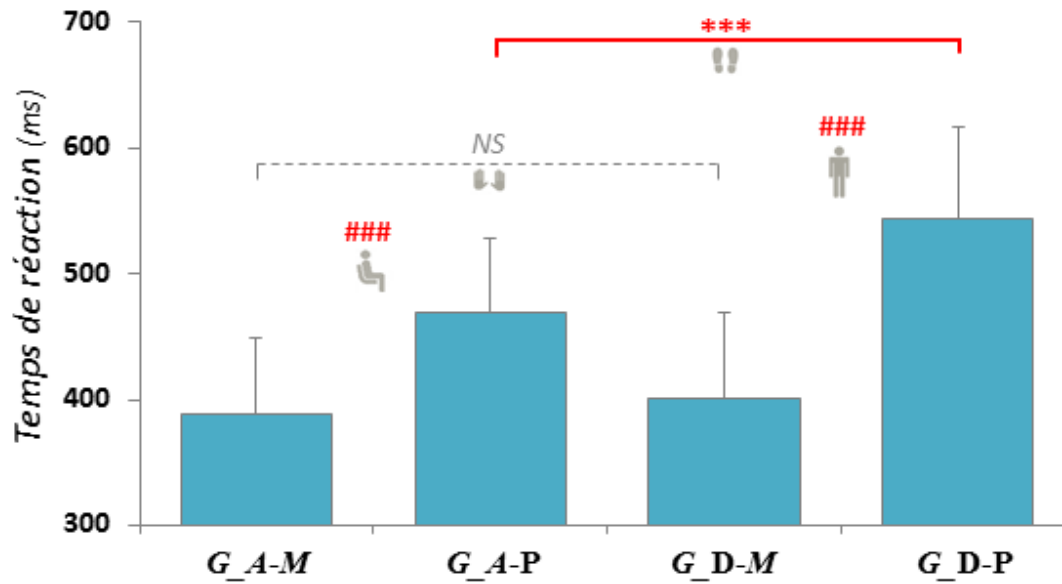


Figure 17. Illustration de l'effet Groupe ($p < 0.001$) obtenu sur les valeurs de temps de réaction lors de la réalisation des tâches cognitive proposées par Nassauer & Halperin(2003).

Note. Les barres d'erreurs représentent les écart-types. ***: $p < 0.001$; ###: différence entre les deux groupes présentant la même configuration posturale ($p < 0.001$); NS : non-significatif; G_A: position assise; G_D: position debout; M: réponses manuelles; P: réponses podales.

3. Discussion

L'objectif principal de cette étude était de tester la robustesse des résultats rapportés par Nassauer & Halperin (2003) au regard de la complexité posturale dans laquelle était évalué le sujet : assis ou debout, réponses manuelles ou podales.

Il s'avère que ces différentes configurations posturales ne modifient en rien le profil des résultats rapporté dans la littérature. En effet, les effets principaux liés aux conflits manipulés ont été observés, confirmant que ce paradigme est capable de rendre compte des capacités inhibitrices du sujet face à un conflit perceptif ou moteur. De plus, la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur (tâche IP_&IM) a systématiquement abouti à un effet additif sur les TR.

Ces résultats, communs à tous les groupes, soutiennent l'interprétation selon laquelle les processus inhibiteurs étudiés mobilisent des ressources cognitives distinctes chez le jeune adulte, quels que soient l'effecteur de réponse ou la configuration posturale du sujet.

Conformément à la littérature, un allongement du TR a été observé lorsque la complexité expérimentale était augmentée par des réponses podales [ex. TR G_{A-M} < TR G_{A-P}], et d'autant plus en position bipédique (TR G_{A-P} < TR G_{D-P}). En accord avec la littérature, ce résultat confirme que la quantité de ressources attentionnelles nécessaire à la réalisation de tâches de TR est augmentée lorsque le sujet doit produire des réponses podales et ce, d'autant plus lorsqu'il se tient debout. Néanmoins, contrairement à de nombreux travaux [ex. Caldwell et al., 2003; Lajoie et al., 1996; Vuillerme et al., 2002], la manipulation de la contrainte posturale n'a pas systématiquement impactée les performances de TR. En effet, les analyses globales ont révélé que lorsque des réponses manuelles étaient attendues (G_{A-M} vs. G_{D-M}), la position du sujet n'avait aucune incidence sur ses performances. Certains travaux ont également rapporté un tel résultat suite à la réalisation en position assise et debout de tâches de TRS (Remaud et al., 2016; Teasdale et al., 1993), de TRC (Shumway-Cook and Woollacott, 2000) et d'inhibition [ex. Stop signal, Stroop (Redfern et al., 2001; Russell et al., 2016)]. L'argument avancé est que la contrainte posturale produite par la station orthostatique n'est pas assez importante pour engendrer une augmentation du coût attentionnel associé aux performances manuelles de TR, du moins chez le jeune adulte.

Malgré l'allongement des TR, la manipulation de la contrainte posturale et des effecteurs mobilisés n'a entraîné aucune interaction avec les conflits inhibiteurs [ex. *Groupe * Conflit Perceptif*]. A l'instar de l'inhibition mesurée via le test du Stop signal (Redfern et al., 2001), la charge attentionnelle liée à l'IP ou l'IM n'impacte donc pas spécifiquement le coût attentionnel de la tâche lorsque celle-ci est réalisée dans une configuration posturale plus complexe. Par

ailleurs, l'absence d'interaction *Groupe * Conflit Perceptif * Conflit Moteur* confirme que les processus d'IP et d'IM mobilisent vraisemblablement des ressources cognitives distinctes, quelles que soient la position et la modalité de réponse attendue.

Ainsi, la validité de ce paradigme et le profil de résultats classiquement rapporté résistent à la manipulation de la complexité posturale, renforçant ainsi l'interprétation d'une dissociation des processus d'IP et d'IM chez le jeune adulte.

Cette dissociation théorique peut être à nouveau mise à l'épreuve, au regard cette fois de la complexité sensorielle présente lors de la mobilisation de ce paradigme. En effet, de nombreux travaux ont rapporté que les TR étaient impactés par le contexte sensoriel, avec des TR plus longs lorsque les informations sensorielles disponibles sont altérées (Schlesinger et al., 1998; Teasdale & Simoneau, 2001) et particulièrement les informations proprioceptives (Fuhrman et al., 2015; Newell & Mansfield, 2008; Redfern et al., 2001; Stamenković et al., 2014; Teasdale et al., 1993).

Etude 2. En quelques mots

- *La complexité posturale engendrée par la posture orthostatique n'affecte pas le profil des performances de TR lors des tâches de conflit.*
- *En cas de réponses manuelles, la charge attentionnelle associée aux tâches cognitives est identique quelle que soit la complexité posturale.*
- *Les effecteurs de réponses mobilisés n'affectent pas le profil des performances d'IP et d'IM, bien que les réponses podales aient systématiquement engendré une augmentation globale du TR.*

Et maintenant : La perturbation du contexte proprioceptif impacte-elle les TR issus des tâches expérimentales de Nassauer & Halperin (2003) ?

III. Paradigme de Nassauer & Halperin (2003) et perturbation des informations proprioceptives

Il est reconnu que la modification des entrées proprioceptives est susceptible d'affecter les performances de TR. C'est par exemple ce qu'ont rapporté Teasdale et al. (1993) lors d'une tâche auditive de TRS conjointe à une perturbation des informations proprioceptives via une surface déstabilisante [i.e. mousse de 5 cm d'épaisseur] ($p < 0.01$, TRS contexte neutre : 208 ± 26 ms vs. TRS proprioception altérée : 219 ± 36 ms, +5%). Il est important de préciser que Redfern et al. (2001) ont obtenu le même profil de résultats lors d'une tâche visuelle de TRS ($p < 0.01$, TRS contexte neutre : 201 ms vs. TRS proprioception altérée : 210 ms, +5%). L'hypothèse avancée est que la dégradation des informations proprioceptives engendre une difficulté posturale plus importante, nécessitant dès lors un investissement accru de ressources attentionnelles pour assurer le contrôle de la posture (Redfern et al., 2001; Teasdale et al., 1993).

Cette hypothèse a également été avancée suite aux TR obtenus lors d'une tâche d'inhibition. En effet, de moindres performances de TR ont été rapportées lors d'une tâche de *Stop signal* [inhibition : 20% de signaux *stop* (Logan et al., 1997)] lorsque la complexité posturale, liée à une altération des informations sensorielles disponibles⁷³, augmentait (Redfern et al., 2001).

A contrario, d'autres travaux n'ont pas observé d'effet du contexte proprioceptif sur le TR (Schlesinger et al., 1998; Teasdale & Simoneau, 2001). Précisément, Marsh & Geel (2000) ont mis en évidence que le TRS de sujets jeunes ($n = 14$, 25.7 ± 2.3 ans) n'était pas affecté par la surface compliant [i.e., mousse de 12.7 cm d'épaisseur] sur laquelle ils maintenaient un

⁷³ Dans cette étude, le contexte sensoriel était altéré d'un point de vue proprioceptif par l'intermédiaire d'une surface d'appui rotative ainsi que d'un point de vue visuel par la rotation de la scène visuelle.

équilibre orthostatique. Les arguments explicatifs étaient essentiellement méthodologiques, tels que la simplicité de la tâche de TR réalisée ou le profil *actif* des sujets (Marsh & Geel, 2000).

Il a également été rapporté que les performances inhibitrices évaluées par le test de Stroop⁷⁴ n'étaient pas affectées par une perturbation proprioceptive chez le jeune adulte (Olivier et al., 2007). Par exemple, Olivier et al. (2010) ont rapporté que de jeunes adultes ($n = 9$, 25.7 ± 2.3 ans) présentaient des performances [i.e., nombre de réponses, proportion d'erreur] statistiquement équivalentes lorsque la complexité posturale était augmentée par l'application de vibrations au niveau des chevilles. La même observation a été rapportée lorsque le contexte proprioceptif était altéré par une surface déstabilisante [i.e., mousse de 2 cm d'épaisseur] (Palluel et al., 2010). De tels résultats suggèrent donc que chez le jeune adulte les ressources nécessaires à la réalisation du Stroop ainsi qu'à la gestion de la perturbation proprioceptive ne se recouvrent pas.

Au-delà des résultats divergents quant aux effets des perturbations proprioceptives sur les TR et les capacités d'inhibition, il semblait intéressant dans le cadre de cette thèse d'en tester les effets lors de la réalisation du paradigme de Nassauer & Haleprin (2003).

Avant cela, il est important de souligner que les travaux évaluant l'effet du contexte proprioceptif sur le TR et les capacités inhibitrices ne le manipulent pas selon les mêmes méthodes. En effet, certains mobilisent une plateforme rotative (Redfern et al., 2001; Schlesinger et al., 1998) ou une surface compliant [ex. mousse] (Marsh & Geel, 2000; Palluel et al., 2010; Teasdale et al., 1993) pour modifier le contexte proprioceptif, tandis que d'autres utilisent des

⁷⁴ Pour s'affranchir des difficultés de lecture de leurs plus jeunes sujets (7-11 ans), Olivier et al. (2007, 2010) ont mobilisé une tâche de Stroop modifiée dans laquelle les mots étaient remplacés par des images de fruits (fraise, banane, pomme, orange) coloriés de différentes couleurs (rouge, jaune, vert, orange).

vibrations par l'intermédiaire d'une plateforme vibrante (Newell & Mansfield, 2008; Redfern et al., 2002; Stamenković et al., 2014) ou de dispositifs spécifiques maintenus au niveau des chevilles (Olivier et al., 2007; Teasdale & Simoneau, 2001). Or, il a été montré que la nature de la perturbation proprioceptive pouvait avoir un impact plus ou moins important sur le TR. En effet, une perturbation proprioceptive induite par une plateforme vibrante impacterait davantage le TRC de jeunes adultes ($N = 12$, 21-35 ans) qu'une perturbation induite par des mouvements de translation de la plateforme (Müller et al., 2007).

Etant donné les effets largement identifiés qu'elle engendre sur la posture (décrits ci-après), la méthode d'application locale de vibrations sera mobilisée dans ce travail de thèse comme un outil non invasif de perturbation du système proprioceptif.

III.1 Vibrations tendineuses localisées

1. Vibration : Définition

Une vibration est un ensemble d'oscillations mécaniques caractérisées selon deux paramètres : la *fréquence*, représentant le nombre de cycles par unité de temps (exprimée en Hertz - *Hz*) et l'*amplitude*, illustrant la moitié de la différence entre la valeur minimale et maximale d'une oscillation (exprimée en millimètre - *mm*).

2. Perturbation proprioceptive par vibrations

Bien que différents récepteurs sensoriels de l'organisme soient sensibles aux vibrations, tels que les récepteurs cutanés [i.e., corpuscules de Ruffini, de Merkel], les structures les plus sensibles à cette perturbation sont les FNM, et plus particulièrement les fibres afférentes primaires [*fibres Ia*] (Burke, 1980; Burke et al., 1976). Comme précédemment décrit (cf. pages

60-62), ces propriocepteurs sensibles à l'étirement musculaire sont activés en présence de vibrations et sont à l'origine d'un *réflexe tonique vibratoire* détaillé ci-après.

Lorsqu'un muscle (ou un tendon) est exposé à des vibrations mécaniques, une contraction réflexe est observée, accompagnée d'une relaxation de ses antagonistes. Spécifiquement, la vibration du muscle induit une sensation erronée de déplacement de l'articulation concernée, de par un étirement (illusoire) de ce muscle. Dès lors s'activent les fibres afférentes Ia, responsables de l'activation des motoneurones α ⁷⁵ du muscle, engendrant ainsi sa contraction afin de contrebalancer le déplacement perçu (Gilhodes et al., 1986; Goodwin et al., 1972). Cette réaction en chaîne, dite réflexe tonique vibratoire, est observée sur quasiment tous les muscles squelettiques (Eklund & Hagbarth, 1966; Roll, 2003).

La Figure 18 illustre ce réflexe lors de l'application de vibrations au niveau des tendons d'Achille. Il est reconnu que cette stimulation vibratoire spécifique provoque un déséquilibre du corps vers l'arrière (Eklund, 1972; Kavounoudias et al., 1999). Cette réaction posturale est la conséquence de la stimulation des afférences Ia des fléchisseurs plantaires qui, de par les vibrations, renseignent le système nerveux central de l'étirement de ces derniers. Dès lors, afin de rétablir une posture stable, l'activation des motoneurones α conduit à la contraction des fléchisseurs plantaires (Figure 18-A). Or, étant donné que l'étirement renseigné par les afférences Ia n'était qu'une illusion induite par les vibrations, la contraction des fléchisseurs plantaires engendre une projection du centre de masse vers l'arrière (Figure 18-B).

III.2 Problématique

Etant donné le potentiel impact du contexte proprioceptif sur les TR, il semble important d'examiner **si différentes configurations proprioceptives influencent le profil de résultats**

⁷⁵ Les motoneurones α permettent l'innervation des fibres musculaires afin de provoquer leur contraction.

rapportés dans la littérature chez le sujet jeune. Pour ce faire, différentes configurations posturales associées à différentes sollicitations proprioceptives ont été testées. L'hypothèse soutenue était que l'augmentation du coût attentionnel engendrée par la perturbation proprioceptive pouvait entraîner une modification du profil de résultats, et de ce fait, conduire à une reconsidération des interprétations avancées.

Une telle étude permettait également de questionner le stade d'influence [i.e., perceptif, décisionnel et/ou moteur, Figure 6, page 93] des vibrations au sein de la chaîne du traitement de l'information.

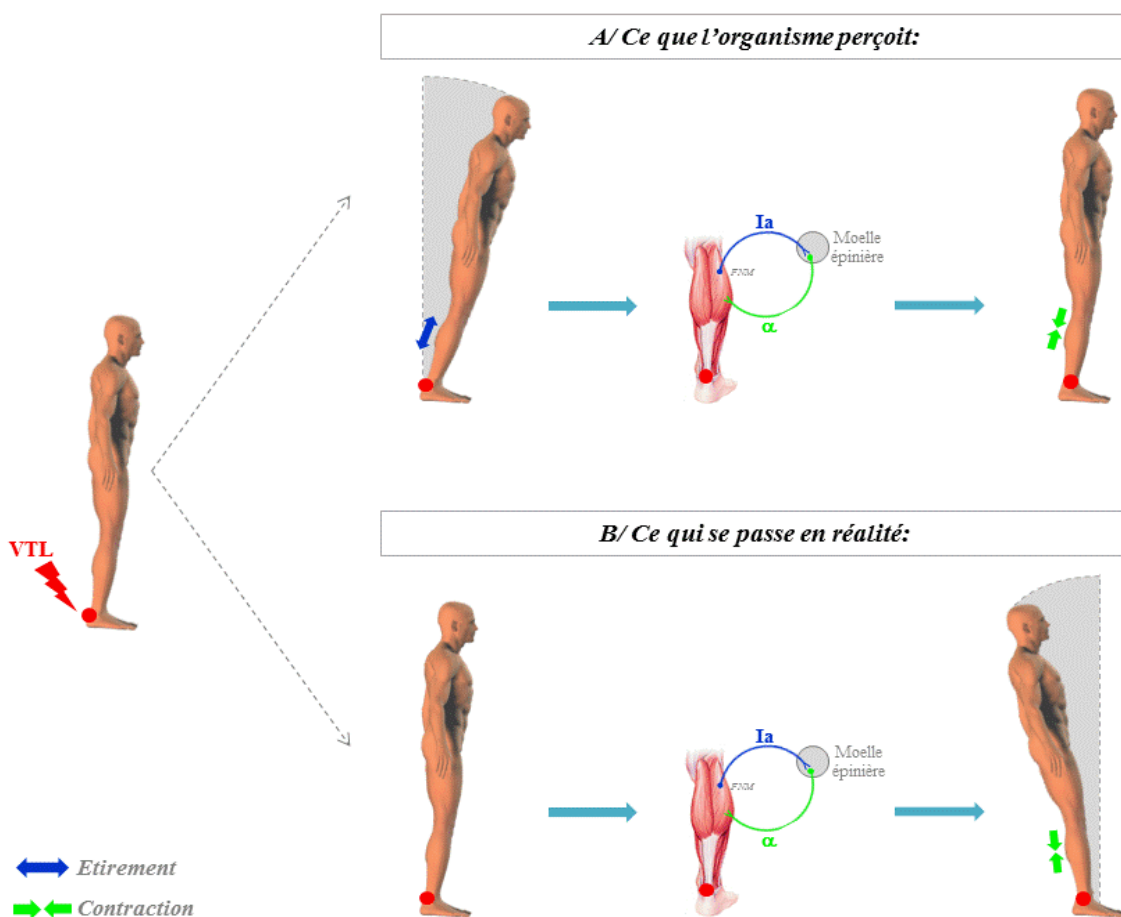


Figure 18. Illustration de la réponse posturale A/ illusoire et B/ réelle induite par l'application de vibrations au niveau des tendons d'Achille.

Note. VTL : vibrations tendineuses localisées ; FNM : fuseaux neuromusculaires; Ia : afférence primaire des fuseaux neuromusculaires; α : motoneurones alpha.

III.3 Etude 3: Effets de l'application de vibrations tendineuses lors de la réalisation du paradigme de Nassauer & Halperin (2003)

1. Méthode

1.a) Sujets

Cinquante sujets (34 hommes et 16 femmes, 42 droitiers et 8 gauchers, âge moyen $21,5 \pm 2,3$ ans) ont pris part volontairement à cette étude. Aucun d'entre eux n'avait d'expérience préalable aux tâches réalisées.

1.b) Tâches de temps de réaction

Les tâches (TRS, TRC₂, neutre, conflit perceptif, conflit moteur et combinaison des conflits) réalisées lors de cette expérimentation étaient identiques à celles des études précédentes (cf. pages 101-105). L'ordre de passation de ces tâches était randomisé, chacune d'entre elles étant suivie par 90 secondes de repos.

1.c) Effecteurs de réponse

Lors de chaque tâche, le TR était évalué par l'intermédiaire de réponses manuelles et de réponses podales. Pour rappel, les réponses manuelles consistaient en une pression du pouce sur le bouton presseur tenu dans la main droite ou sur celui tenu dans la main gauche. Les réponses podales consistaient en une levée du talon droit ou gauche.

1.d) Vibrations tendineuses localisées (VTL)

Les VTL (fréquence⁷⁶ : 80 Hz, amplitude : 0.2 mm) étaient induites par deux vibrateurs (Vibrateur VB 115 V₂, Techno Concept, France) positionnés sur les tendons d'Achille (Figure

⁷⁶ Il est reconnu que les effets des VTL sont modulés par leur fréquence puisque cette dernière influe sur la proportion de fibres Ia activées. Il a ainsi été montré que ces effets étaient maximaux aux alentours de 80 Hz (Roll & Vedel, 1982; Roll et al., 1989).

18) ou sur les tendons des muscles fléchisseurs du carpe⁷⁷ [i.e., à la jonction entre la main et la partie interne de l'avant-bras]. Ces VTL étaient appliquées en continu durant la réalisation des tâches de TR [i.e., entre 1' et 2'30'' selon la tâche] puis arrêtées lors des 90 secondes de repos.

1.e) Procédure

Les 50 sujets ont été répartis aléatoirement au sein de deux groupes indépendants. Les sujets du premier groupe réalisaient l'ensemble du protocole en position *assise* ($n = 25$, 17 hommes et 8 femmes, âge moyen 21.8 ± 3.3 ans) tandis que les sujets du second groupe le réalisaient en position *debout* ($n = 25$, 17 hommes et 8 femmes, âge moyen 21.2 ± 1.7 ans).

Chaque sujet a pris part à trois sessions expérimentales⁷⁸. Lors des sessions notées S_{VIB_M} et S_{VIB_P} , des VTL étaient respectivement appliquées au niveau des fléchisseurs du carpe et des tendons d'Achille. Durant la session notée S_{CONT} , aucune vibration n'était induite. Il est important de préciser que l'ordre de réalisation de ces trois sessions était systématiquement contrebalancé entre les sujets, chacune d'entre elles étant réalisée au minimum à deux jours d'intervalle.

Au sein de chaque session, le sujet réalisait l'ensemble des tâches de TR avec les mains et avec les pieds comme effecteurs de réponses. Ces tâches étaient donc réalisées deux fois par session, dont une fois avec les VTL appliquées au niveau des effecteurs.

⁷⁷ L'application de VTL au niveau des muscles fléchisseurs du carpe provoque l'illusion d'un mouvement de flexion du carpe sur l'avant-bras (Kito et al., 2006).

⁷⁸ Sur les 150 passations expérimentales réalisées dans le cadre de cette étude 3 (50 sujets \times 3 sessions), une centaine a été menée par **Florane Pasquier** dans le cadre de son stage de Master 2 « *Expertise, Performance, Intervention* » (promotion 2015-2016) réalisé au sein du laboratoire « *Motricité, Interactions, Performance* ».

1.f) Analyse des données et statistiques

L'analyse des données était identique aux études précédentes, avec le TR médian comme variable dépendante principale. Etant donné que chaque sujet réalisait le protocole trois fois, le nombre d'erreurs commises a également été analysé.

Tâche de TRS, de TRC₂ et nombre d'erreurs : Pour chaque groupe et chacune de ces variables, une première ANOVA impliquant le facteur *Session* (3: *S_{VIB_M}* vs. *S_{VIB_P}* vs. *S_{CONT}*) a été réalisée sur les TR (tâches de TRS et TRC₂) et le nombre de réponse erronées (tâches de conflit) issus des réponses manuelles. Une seconde ANOVA a été réalisée sur les données issues des réponses podales.

Tâche de conflit(s) : Pour chaque groupe, deux ANOVA impliquant les facteurs *Session* (3: *S_{VIB_M}* vs. *S_{VIB_P}* vs. *S_{CONT}*), *Conflit perceptif*⁷⁹ (2: Absence vs. Présence) et *Conflit moteur*⁸⁰ (2: Absence vs. Présence) ont été réalisées sur les TR issus respectivement des réponses manuelles et des réponses podales.

2. Résultats

Suite à des problèmes techniques, les performances de deux sujets n'ont pu être enregistrées. Aussi, les analyses statistiques ont été réalisées sur 48 sujets (24 sujets dans le groupe *Assis* et 24 sujets dans le groupe *Debout*).

L'ensemble des TR obtenus (moyenne (ET), en *ms*) sont résumés dans le Tableau 8 (page 142) pour le groupe *Assis* et dans le Tableau 9 (page 143) pour le groupe *Debout*.

⁷⁹ Pour rappel, l'absence de ***Conflit Perceptif*** est évaluée par la moyenne des TR obtenus aux essais M_C et IM_NC tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus aux essais IP_NC et IP&IM_NC (cf. illustration Annexe 1, page 226).

⁸⁰ Pour rappel, l'absence de ***Conflit Moteur*** est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais M_C et IP_NC tandis que sa présence est évaluée par la moyenne des TR obtenus lors des essais IM_NC et IP&IM_NC (cf. Annexe 1, page 226).







2.a) Tâche de TRS et TRC₂

Les résultats statistiques sont rapportés dans les Tableaux 8 et 9. Seule l'analyse des réponses podales du groupe *Debout* a révélé un effet *Session* sur les performances de TRS ($F_{(2,46)} = 9.3, p < 0.001, \eta^2 = 0.28$) et de TRC₂ ($F_{(2,46)} = 7.5, p < 0.01, \eta^2 = 0.24$). Quelle que soit la tâche, cet effet soulignait de moindres performances de TRS et de TRC₂ lors de la *S_{VIB_P}* par rapport aux *S_{VIB_M}* (chaque $p < 0.01$) et *S_{CONT}* (chaque $p < 0.05$). Aucune différence n'a été observée entre ces deux dernières sessions (chaque $p > 0.8$) (Tableau 9).

2.b) Tâches de conflit : Nombre d'erreurs




Le pourcentage de réponses erronées est faible, quels que soient la session, l'effecteur de réponse ou le groupe considéré (groupe *Assis* : proportion totale de réponses erronées $3.4\% \pm 2.4\%$, soit une moyenne de 12.2 erreurs pour 360 essais; groupe *Debout* : proportion de réponses erronées $2.3\% \pm 2.1\%$, soit une moyenne de 8.4 erreurs pour 360 essais). Aucune différence significative entre les trois sessions n'a été révélée (chaque $p > 0.5$) (Tableau 10).

Tableau 10. Pourcentages d'erreurs pour chaque session en fonction de l'effecteur de réponse mobilisé et du groupe d'appartenance. Données exprimées en pourcentage moyen (écart-type).

		<i>S_{VIB_M}</i>	<i>S_{VIB_P}</i>	<i>S_{CONT}</i>	<i>p</i>
		3.47 (2.6)	3.07 (1.7)	3.30 (2.2)	NS
		3.93 (2.8)	3.67 (2.7)	2.80 (2.2)	NS
		3.27 (2.9)	2.80 (2.3)	2.90 (2.4)	NS
		1.99 (2)	1.31 (1.3)	1.71 (1.6)	NS




Note. *S_{VIB_M}* : VTL au niveau des tendons des muscles fléchisseurs du carpe; *S_{VIB_P}* : VTL au niveau des tendons d'Achille; *S_{CONT}* : session contrôle; NS : absence d'effet du facteur *Session*.

Tableau 8. Moyennes des temps de réaction médians obtenues lors de chaque tâche en fonction des effecteurs de réponses mobilisés des sujets réalisant le protocole en position assise. Données exprimées en moyenne (écart-type)

		S_{VIB_M}	S_{VIB_P}	S_{CONT}
Réponses manuelles 	Temps réaction simple ^{NS}	228.78 (32.9)	220.82 (19.8)	223.12 (22.4)
	Temps réaction de choix ^{NS}	283.34 (42.1)	281.26 (37.8)	275.22 (23.6)
	Neutre - Essais M_C	339.88 (57.4)	331.43 (44.3)	338.90 (50.7)
	Conflit perceptif - Essais IP_NC	424.07 (69.3)	412.78 (49.5)	410.73 (66.1)
	Conflit moteur - Essais IM_NC	395.06 (86.6)	378.81 (70)	370.94 (49.9)
	Conflits combinés - Essais IP&IM_NC	456.51 (91.3)	446.86 (85.9)	444.22 (67.1)
Réponses podales 	Temps réaction simple ^{NS}	303.16 (33.4)	311.80 (38.5)	305.64 (31)
	Temps réaction de choix ^{NS}	357.04 (35.1)	357.66 (51.6)	360.21 (35.3)
	Neutre - Essais M_C	409.67 (52.9)	431.02 (61.6)	423.58 (50.5)
	Conflit perceptif - Essais IP_NC	487.96 (56.6)	522.77 (85.5)	500.88 (57.9)
	Conflit moteur - Essais IM_NC	453.23 (53.2)	497.94 (80.1)	457.40 (53.5)
	Conflits combinés - Essais IP&IM_NC	518.01 (78.2)	565.40 (60.1)	529.25 (83)

Note. S_{VIB_M} : perturbation vibratoire au niveau des tendons des muscles fléchisseurs du carpe; S_{VIB_P} : perturbation vibratoire au niveau des tendons d'Achille; S_{CONT} : absence de perturbation vibratoire; M_C : essais sans conflit; IP: inhibition perceptive; NC : non-congruent; IM: inhibition motrice; IP&IM: combinaison des conflits. ^{NS} : absence d'effet du facteur *Session* (chaque $p > 0.3$).

Tableau 9. Moyennes des temps de réaction médians obtenues lors de chaque tâche en fonction des effecteurs de réponses mobilisés des sujets réalisant le protocole en position bipodale. Données exprimées en moyenne (écart-type)

		S_{VIB_M}	S_{VIB_P}	S_{CONT}
Réponses manuelles 	Temps réaction simple ^{NS}	236.02 (44.4)	221.96 (27.8)	235.12 (58.3)
	Temps réaction de choix ^{NS}	272.74 (34.9)	281.13 (46.6)	272.82 (46.1)
	Neutre - Essais M_C	342.27 (46.9)	331.29 (47.6)	339.17 (55.4)
	Conflit perceptif - Essais IP_NC	409.56 (59.9)	398.27 (52.8)	408.57 (60.5)
	Conflit moteur - Essais IM_NC	376.27 (50.4)	364.50 (50.3)	380.27 (72.6)
	Conflits combinés - Essais IP&IM_NC	435.23 (61.1)	421.81 (50.8)	433.70 (67.9)
Réponses podales 	Temps réaction simple ^{***}	372.22 (52.7)	408.36 (73.5) #	368.32 (56.8)
	Temps réaction de choix ^{**}	415.58 (51.8)	454.46 (87.1) #	426.84 (51.9)
	Neutre - Essais M_C	493.40 (61.2)	516.60 (87.6)	489.73 (63.8)
	Conflit perceptif - Essais IP_NC	638.92 (138)	688.71 (125)	608.04 (89.7)
	Conflit moteur - Essais IM_NC	512.35 (44.2)	550.83 (76.3)	519.73 (66.7)
	Conflits combinés - Essais IP&IM_NC	659.33 (145)	685.98 (112)	626.54 (120)

Note. S_{VIB_M} : VTL au niveau des tendons des muscles fléchisseurs du carpe; S_{VIB_P} : VTL au niveau des tendons d'Achille; S_{CONT} : absence de VTL; M_C : essais sans conflit; IP: inhibition perceptive; NC : non-congruent; IM: inhibition motrice; IP&IM: combinaison des conflits; ^{NS} : absence d'effet du facteur *Session* (chaque $p > 0.3$); ^{***} : effet *Session* $p < 0.001$; ^{**} : effet *Session* $p < 0.01$; # : Différence significative par rapport aux S_{VIB_M} et S_{CONT} (chaque $p < 0.05$).

2.c) Tâches de conflit : TR Groupe Assis

Réponses manuelles : Aucun effet du facteur principal *Session* n'a été observé ($p > 0.2$).

L'ANOVA a révélé un effet principal *Conflit Perceptif* ($F_{(1,23)} = 334.5$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.94$; 359.17 ± 64.9 vs. 432.42 ± 73.7 ms, +20%) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,23)} = 40.6$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.64$; 376.25 ± 68.7 vs. 432.42 ± 73.7 ms, +15%), avec des TR plus rapides en absence de conflit. Les interactions potentielles n'étaient pas significatives ($p > 0.1$).

Réponses podales : L'effet principal *Session* ($F_{(2,46)} = 7.1$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.24$) a rapporté des TR plus longs lors de la S_{VIB_P} (499.78 ± 113.8 ms) par rapport aux S_{VIB_M} (467.21 ± 72.6 ms) et S_{CONT} (477.78 ± 74.6 ms) (Figure 19). Ces deux dernières sessions ne présentaient pas de différence significative ($p > 0.7$). Les effets des facteurs *Conflit Perceptif* ($F_{(1,23)} = 68.9$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.75$; 442.47 ± 63 vs. 520.71 ± 95.5 ms, +18%) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,23)} = 25.9$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.53$; 462.64 ± 74.5 vs. 500.54 ± 99.5 ms, +8%) ont été observés, soulignant des TR plus longs en présence de conflit. Aucune interaction n'était significative ($p > 0.3$).

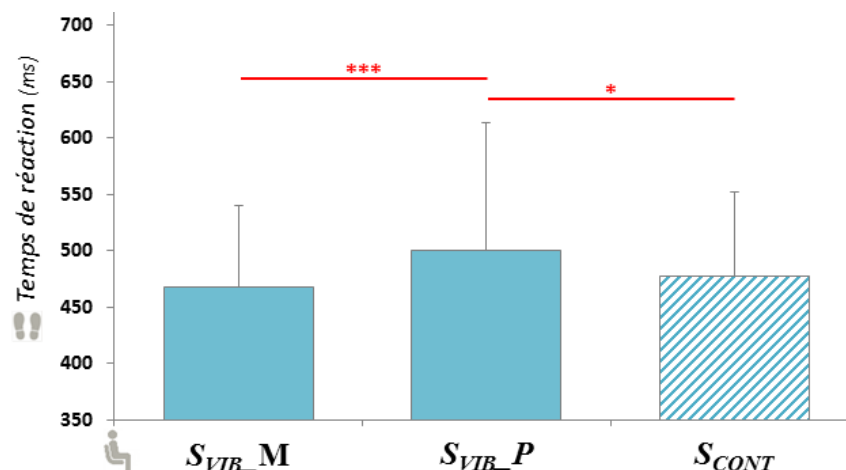


Figure 19. Evolution du temps de réaction (réponses podales) du groupe Assis en fonction des trois sessions.

Note. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$; S_{VIB_M} : vibrations au niveau des tendons des muscles fléchisseurs du carpe; S_{VIB_P} : vibrations au niveau des tendons d'Achille; S_{CONT} : absence de vibrations.

2.d) Tâches de conflit : TR Groupe Debout

Réponses manuelles : L'analyse réalisée a révélé un effet principal *Conflit Perceptif* ($F_{(1,23)} = 275.1, p < 0.001, \eta^2_p = 0.92, 355.63 \pm 56.9$ vs. 417.86 ± 59.6 ms, +17%) et *Conflit Moteur* ($F_{(1,23)} = 82.4, p < 0.001, \eta^2_p = 0.78, 371.52 \pm 63.3$ vs. 401.96 ± 65.3 ms, +8%) où les sujets présentaient des TR plus courts en absence de conflit. L'effet principal *Session* ($p > 0.4$) et les différentes interactions possibles ($p > 0.1$) n'étaient pas significatifs.

Réponses podales : L'effet principal *Session* ($F_{(2,46)} = 4.1, p < 0.05, \eta^2_p = 0.15$) a rapporté de moindres performances de TR lors de la S_{VIB_P} par rapport à la S_{CONT} (561.01 ± 104.3 vs. 610.53 ± 127.6 ms, +9%) (Figure 20). L'effet *Conflit Perceptif* ($F_{(1,23)} = 132.3, p < 0.001, \eta^2_p = 0.85, 513.78 \pm 69.7$ vs. 651.25 ± 124.7 ms, +27%) a souligné que des TR moins importants en présence de conflit, à l'instar du *Conflit Moteur* ($F_{(1,23)} = 7.2, p < 0.01, \eta^2_p = 0.24, 572.57 \pm 123.9$ vs. 592.46 ± 119.9 ms, +4%). Aucune interaction n'était significative ($p > 0.1$).

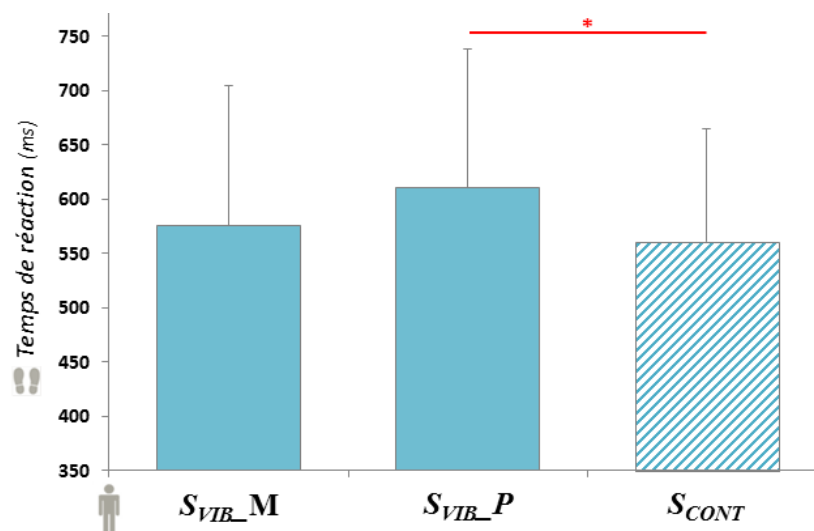


Figure 20. Evolution du temps de réaction (réponses podales) du groupe *Debout* en fonction des trois sessions.

Note. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. * $p < 0.05$; S_{VIB_M} : vibrations au niveau des tendons des muscles fléchisseurs du carpe; S_{VIB_P} : vibrations au niveau des tendons d'Achille; S_{CONT} : absence de vibrations.

3. Discussion

L'objectif de cette dernière étude méthodologique était de mettre à l'épreuve l'interprétation associée au profil de résultats classiquement obtenu, au regard de la complexité attentionnelle induite par le contexte proprioceptif. L'application de VTL n'a pas modifié le profil de résultats initial, à savoir des effets principaux des conflits perceptif et moteur et l'augmentation additive des TR lors de leur résolution simultanée. Une nouvelle fois, le paradigme de Nassauer & Haleprin (2003) et leurs résultats princeps résistent à la manipulation expérimentale de différentes variables, telle qu'ici la perturbation des afférences proprioceptives, et ce, quelles que soient sa localisation, les effecteurs de réponse mobilisés et la position adoptée.

Par ailleurs, un impact spécifique des VTL appliquées au niveau des tendons d'Achille a été rapporté sur les TR issus des réponses podales. Aucune interaction entre les capacités inhibitrices évaluées et la modification du contexte proprioceptif n'a été observée. Etant donné l'accord entre les résultats susmentionnés et ceux de l'étude 2, seuls ces deux résultats spécifiques seront discutés ci-après.

3.a) TR et vibrations

Concernant les performances de TRS et de TRC₂ du groupe *Debout*, il s'avère que les vibrations des tendons d'Achille affectaient les réponses podales. En effet, par rapport à la session contrôle, une augmentation respectivement de 10% et 6% des performances de TRS et de TRC₂ a été observée en présence d'une perturbation proprioceptive au niveau des effecteurs de réponse. Un tel résultat confirme que la complexité posturale induite par la dégradation des informations proprioceptives disponibles au niveau des chevilles nécessite que le sujet alloue davantage de ressources attentionnelles au maintien de sa posture bipédique (Redfern et al., 2001; Teasdale et al., 1993). Or, pour les sujets réalisant le protocole en position *assise*, l'application de

VTL au niveau des tendons d'Achille n'altérerait pas le TRS ou TRC₂ de ces réponses podales. La charge attentionnelle associée à la réalisation de ces tâches en position assise n'est donc pas affectée par la présence de VTL, suggérant ainsi un contrôle peu coûteux de cette perturbation.

Concernant les tâches de conflit, un allongement spécifique des TR en présence de VTL sur les tendons d'Achille était observé lors des réponses podales en position *debout*. De plus, contrairement aux tâches de TRS et le TRC₂, cette augmentation spécifique du TR a été également observée lorsque le sujet était *assis*. En d'autres termes, quelle que soit la position du sujet, l'application de VTL au niveau des tendons d'Achille augmente le coût attentionnel associé aux réponses podales. Ainsi, la charge attentionnelle plus importante associée aux tâches de conflit par rapport à celles de TRS et le TRC₂ nécessite une gestion plus coûteuse en attention de cette configuration expérimentale, même en position assise.

3.b) Inhibition et vibrations

Lors des réponses manuelles, les performances inhibitrices n'ont pas souffert de la présence de VTL, quelle que soit leur localisation [cf. absence d'effet *Session*]. Une telle observation est en accord avec les résultats d'Olivier et al. (2010) qui rapportaient que l'application de VTL au niveau des chevilles du jeune adulte n'impacte pas les performances inhibitrices évaluées via une tâche de Stroop modifiée.

Concernant les réponses podales, au-delà de l'allongement général des TR en présence de VTL au niveau des tendons d'Achille, il est important de souligner que cette perturbation n'a pas impacté spécifiquement les performances inhibitrices. En effet, aucune interaction n'a été observée entre le contexte proprioceptif et l'IP ou l'IM [ex. Interaction *Session * Conflit Perceptif*]. Ainsi, la charge attentionnelle associée au contrôle inhibiteur des conflits mobilisés n'est pas impactée par cette perturbation proprioceptive vibratoire.

Aucun lien entre les processus d'IP, d'IM et la nature du contexte proprioceptif ne semble donc apparaître chez le jeune adulte. Ces résultats sont ainsi en accord avec les analyses corrélationnelles de Redfern et al. (2009).

3.c) Vibrations et chaîne du traitement de l'information

→ *Impact du stade moteur ?*

D'après Nassauer & Halperin (2003), le conflit engendré par la localisation de la flèche (IP) interviendrait précocement sur la chaîne du traitement de l'information, au stade perceptif, tandis que l'incompatibilité stimulus-réponse (IM) engendrerait un conflit au stade décisionnel. Selon la méthode des facteurs additifs, l'absence d'interaction spécifique entre ces capacités inhibitrices et le contexte proprioceptif suggérerait que les VTL n'affectent pas le même stade de traitement que l'IP et l'IM. L'hypothèse serait alors que cette perturbation impacte plus spécifiquement le stade moteur de la chaîne du traitement de l'information.

La mise à l'épreuve de cette hypothèse pourrait notamment se faire par l'intermédiaire d'une tâche de TRC₂ mobilisant une incertitude quant à la force requise pour exécuter la réponse. En effet, il est reconnu que la charge informationnelle liée à cette variable affecte spécifiquement le stade moteur du traitement de l'information (Sanders, 1990). La tâche de TR pourrait par exemple être composée d'un signal de réponse apparaissant systématiquement au centre de l'écran, la couleur de ce signal indiquant la force à fournir pour répondre [ex. réponse à fournir : pression du pied droit sur un bouton; ● : pression contrôle vs. ● : pression forte]. Si la réalisation d'une telle tâche en présence de VTL au niveau des tendons d'Achille engendre une augmentation spécifique du TR issu des réponses « *pression forte* », alors l'impact supposé des VTL au stade moteur du traitement de l'information serait confirmé.

Autre exemple, étant donné que la durée de la période préparatoire variait d'un essai à l'autre, cette mise à l'épreuve pourrait également se faire directement à partir des TR mesurés dans cette étude. En effet, cette durée est reconnue pour affecter spécifiquement l'opération d'*ajustement moteur* du stade moteur du traitement de l'information. Dès lors, si un allongement spécifique des TR est observé suite à une période préparatoire courte par rapport à une période préparatoire longue, l'impact spécifique des VTL au stade moteur du traitement de l'information serait confirmé.

→ *Impact du stade perceptif ?*

Le modèle proposé par Sanders (1990)⁸¹ suggère que le stade perceptif du traitement de l'information fait intervenir trois opérations cognitives. Dès lors, l'absence d'interaction entre l'IP et le contexte proprioceptif pourrait illustrer que ces deux variables interviennent lors de différentes opérations de ce stade perceptif. Les vibrations pourraient par exemple faire l'objet d'un prétraitement perceptif⁸² tandis que la résolution du conflit perceptif s'inscrirait dans l'opération d'extraction des caractéristiques et/ou de l'identification du signal (Sanders, 1990).

→ *Impact du stade décisionnel ?*

Etant donné que la présence de VTL n'a pas conduit à un allongement spécifique du TR lors de la tâche d'IM (incompatibilité stimulus-réponse), et que le stade décisionnel est composé d'une seule opération, il est alors pertinent de suggérer que les VTL n'affectent pas le mécanisme de sélection de la réponse.

⁸¹ D'après Sanders (1990), le stade *perceptif* de la chaîne du traitement de l'information serait composé des opérations de 1/ prétraitement, 2/ d'extraction des caractéristiques et 3/ d'identification du signal, le stade *décisionnel* comprendrait uniquement la sélection de la réponse et le stade *moteur* impliquerait des opérations de 1/ programmation, 2/ chargement du programme et 3/ ajustement moteur.

⁸² Le rôle de cette opération serait de filtrer et de mettre en forme les informations entrant dans le système (Delignière & Deschamps, 2000).

Il serait possible de confirmer cette suggestion en comparant les TR obtenus avec et sans vibrations lors des tâches de TRS et de TRC₂, puisque le nombre d'alternatives [i.e., TRS : 1 alternative *vs.* TRC₂ : 2 alternatives] affecte le stade décisionnel du traitement de l'information. Dans ce cas, la comparaison des TR ne devrait pas rapporter d'interaction entre ce nombre d'alternatives et le contexte proprioceptif.

Pour conclure, au-delà de l'illustration de la robustesse du profil de résultats rapporté par Nassauer & Halperin (2003), quel que soit le contexte proprioceptif, cette étude a mis en évidence que l'application de VTL au niveau des tendons d'Achille induit une perturbation proprioceptive suffisamment importante pour perturber le jeune adulte lors de tâches de TR à réponses podales.

Etude 3. En quelques mots

- *Un même profil de résultats a été observé quels que soient le contexte proprioceptif et la localisation des vibrations.*
- *Les performances d'inhibition ne sont pas spécifiquement impactées par la présence de vibrations.*
- *Le coût attentionnel associé à la tâche augmente en présence de vibrations au niveau des tendons d'Achille, uniquement lors des réponses podales.*

↓

L'application de vibrations au niveau des tendons d'Achille constitue une méthode efficace de perturbation proprioceptive lors d'une tâche de TR à réponses podales.

IV. Première phase expérimentale : discussion générale et conclusion

En amont de l'exploration de la problématique centrale de cette thèse, une mise à l'épreuve méthodologique et théorique a été adressée au paradigme de Nassauer & Halperin (2003). Une attention particulière a été portée sur la quantité d'informations présente dans les tâches expérimentales ainsi qu'à leur ordre de passation. L'influence sur les résultats de la complexité attentionnelle induite par la position adoptée, les effecteurs de réponses mobilisés et/ou le contexte proprioceptif a également été évaluée.

Dans ce cadre, les trois études réalisées sur un ensemble de 198 jeunes adultes présentaient un double objectif. D'une part, il s'agissait de mettre à l'épreuve la validité de ce paradigme peu mobilisé dans la littérature en tant qu'outil pertinent d'évaluation de la fonction d'inhibition. D'autre part, il s'agissait d'évaluer la robustesse des résultats princeps, révélateurs selon Nassauer & Halperin (2003) et Germain & Collette (2008) de deux processus distincts d'inhibition dite perceptive et motrice chez le jeune adulte.

Cette première phase expérimentale a montré que la quantité d'information telle qu'elle est manipulée dans les tâches de ce paradigme était un prérequis nécessaire pour induire les conflits cognitifs attendus et, de ce fait, évaluer les capacités inhibitrices en charge de leur résolution [*Etude 1*]. Quant à l'ordre fixe initialement imposé pour une passation de ces tâches, il ne peut être considéré comme une condition méthodologique essentielle à l'évaluation de ces capacités inhibitrices. Il a par ailleurs été démontré que, chez le jeune adulte, ce paradigme permet l'évaluation des capacités inhibitrices quel que soit le contexte expérimental mobilisé. De plus, le profil des résultats classiquement observé dans la littérature résiste à la manipulation de différentes formes de perturbation « attentionnelle » [*Etudes 2 et Etude 3*].

L'ensemble de ces résultats accrédite les interprétations de Nassauer & Halperin (2003) et de Germain & Collette (2008) quant à l'existence chez le jeune adulte de deux processus inhibiteurs distincts : l'un responsable de la résolution du conflit engendré par les caractéristiques du stimulus (IP), l'autre en charge du conflit généré par la sélection de la réponse attendue (IM). Pour rappel, cette interprétation est basée sur l'observation d'un allongement additif du TR lors de la résolution simultanée de ces deux conflits. Selon la méthode des facteurs additifs (Sternberg, 1969), cet effet additif suggère que l'IP et l'IM affecteraient chacune un stade spécifique de la chaîne du traitement de l'information, soutenant ainsi la mobilisation de ressources cognitives distinctes (Nassauer & Halperin, 2003).

Néanmoins, une autre interprétation pourrait être avancée. En effet, l'IP et l'IM pourraient renvoyer à un même processus de contrôle inhibiteur, ce dernier pouvant intervenir à différents stades du traitement de l'information en fonction du conflit à résoudre. Dans ce cas, la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur n'entraînerait pas non plus d'effet d'interaction puisque leurs résolutions se concentreraient sur différents stades de traitement. Les TR plus longs observés lors de la tâche d'IP&IM seraient ainsi le reflet de la quantité de ressources attentionnelles plus importante nécessaire à l'inhibition de ces conflits spécifiques en raison de la complexité expérimentale de la tâche [i.e., $I = 2$ bits, présence de deux conflits]. Il en serait de même pour les TR significativement plus longs en IP qu'en IM (cf. Tableau 4, page 98). En d'autres termes, l'augmentation de la difficulté informationnelle de la tâche nécessiterait que cette inhibition soit plus contrôlée, plus coûteuse en attention.

Les résultats de cette première phase expérimentale confirment la validité du paradigme en tant qu'instrument de mesure de la fonction d'inhibition. Cependant, l'hypothèse de la

dissociation entre l'IP et de l'IM, bien que renforcée par les résultats obtenus, reste encore à démontrer. Face à cette question, plusieurs pistes expérimentales peuvent être proposées.

A nouveau basé sur une démarche expérimentale associée à la méthode des facteurs additifs, il s'agirait de manipuler une variable reconnue pour affecter un stade spécifique du traitement de l'information. Il est admis que manipuler la qualité du signal de réponse [i.e., signal à intensité lumineuse faible *vs.* forte] affecte le stade perceptif de traitement, et plus précisément l'opération d'extraction des caractéristiques du signal (Azorin et al., 1995). Pour rappel, le conflit engendré par les caractéristiques du stimulus (IP) interviendrait au stade perceptif tandis que celui de l'incompatibilité stimulus-réponse (IM) interviendrait au stade décisionnel (Sanders, 1983). Si l'IP et l'IM renvoient à deux processus distincts, alors la variation de l'intensité lumineuse des stimuli lors des différentes tâches de Nassauer & Halperin (2003) engendrerait une augmentation du TR uniquement lors des tâches de conflit perceptif.

Toutefois, il est important de souligner que cette méthode des facteurs additifs est vivement débattue et critiquée au sein de la littérature, de par la conceptualisation discrète et sérielle du traitement de l'information qui la sous-tend. En effet, de nombreux travaux soutiennent l'idée d'une transmission non-discrète de l'information, « en cascade » d'un stade de traitement à l'autre (Cohen et al., 1990; Ferrand, 2001; McClelland, 1979; Taylor, 1976). Une telle modélisation *continue* de la chaîne de traitement de l'information aborde ainsi différemment la présence ou non d'interaction statistique entre deux variables manipulées. Selon Taylor (1976), une absence d'interaction ne signifie pas nécessairement que les deux variables influencent, sans recouvrement temporel, différents stades de traitement. Il est envisageable que l'activation simultanée de deux stades de traitement annule un potentiel effet d'interaction. De même, la présence d'une interaction pourrait être l'illustration de deux processus opérant à un même stade de traitement mais indépendamment l'un de l'autre. La critique de cette méthode est également

liée au fait qu'elle suppose une allocation invariante des ressources, négligeant ainsi l'effort⁸³ consenti dans la tâche.

Ainsi, afin d'enrichir les résultats princeps, l'utilisation de l'imagerie cérébrale permettrait d'identifier les réseaux neuronaux impliqués lors de la résolution des conflits perceptif et moteur proposés dans ces tâches. Il a d'ores et déjà été rapporté que la source du conflit cognitif influençait le profil d'activation corticale (Botvinick et al., 1999; van Veen et al., 2001). Chez le jeune adulte ($N = 17$, 18-24 ans), il a par exemple été observé que le gyrus frontal inférieur gauche et le cortex cingulaire antérieur étaient spécifiquement et respectivement impliqués au cours d'un conflit généré par les caractéristiques du stimulus et le degré de compatibilité stimulus-réponse (Nelson et al., 2003). Si l'IP et l'IM renvoient à deux processus inhibiteurs différents, leur expression devrait alors se caractériser par l'activation de réseaux, au moins en partie, distincts (Nassauer & Halperin, 2003).

Pour conclure, cette première phase expérimentale de validation du paradigme a permis de poser plus clairement l'enjeu central de cette thèse, à savoir : *le vieillissement induit-il un contrôle inhibiteur spécifique des informations proprioceptives lors d'une tâche d'initiation de pas ?* Sur la base des travaux décrits dans la revue de littérature, l'hypothèse soutenue ici est qu'en présence d'un contexte proprioceptif perturbé, la régulation posturale de la personne âgée nécessite un contrôle inhibiteur perceptif des informations proprioceptives erronées.

Afin de mettre à l'épreuve cette hypothèse, trois expérimentations ont été réalisées. La première, évaluant uniquement des sujets jeunes (< 30 ans), a permis d'apporter des résultats préliminaires ainsi qu'un regard sur la faisabilité du protocole expérimental mis en place. La deuxième évaluait des sujets jeunes et des sujets âgés (> 65 ans) lors d'une tâche d'initiation de

⁸³ La notion d'*effort* renvoie à l'investissement volontaire de ressources attentionnelles dans la tâche (Kahneman, 1973).

pas en présence de vibrations afin d'étudier si ces dernières amenaient à un contrôle inhibiteur spécifique avec l'avancée en âge. Enfin, sur la base d'une modalité de réponse « statique », la troisième expérimentation a permis de mettre à l'épreuve les résultats observés chez le sujet âgé lors de cette seconde phase expérimentale.

Seconde phase expérimentale

Exploration des interactions entre inhibition cognitive et fonction sensorimotrice chez le jeune adulte et l'adulte âgé

Etude 4: Inhibition, initiation de pas et vibrations chez le sujet jeune

Etude 5: Inhibition, initiation de pas et vibrations : Effets du vieillissement

Etude 6: Inhibition & vibrations : réponses podales « statiques » chez le sujet âgé

Seconde phase expérimentale

I. Interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours de l'âge.....	159
I.1. Rappel des enjeux et objectifs	159
I.2. Etude 4: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice chez le jeune adulte ?	161
1. Hypothèse	161
2. Méthode.....	161
3. Résultats	168
4. Discussion.....	173
I.3. Etude 5: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours du vieillissement ?	178
1. Hypothèse	178
2. Méthode.....	178
3. Résultats	185
4. Discussion.....	196
I.4. Etude 6: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice chez le sujet âgé lors d'une tâche posturale statique?	206
1. Hypothèse	206
2. Méthode.....	206
3. Résultats	209
4. Discussion.....	212
II. Seconde phase expérimentale : discussion générale et conclusion	216
1. Apports théoriques et expérimentaux	216
2. Perspectives STEP'INH	220
3. Vieillesse, inhibition perceptive et inhibition motrice : perspectives.....	221

I. Interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours de l'âge

I.1. Rappel des enjeux et objectifs

Grâce à l'utilisation du test de Stroop ou de Go/NoGo, de nombreux travaux ont mis en évidence une interférence du contrôle inhibiteur sur les performances d'équilibre orthostatique (Wollesen et al., 2016; Zeynalzadeh Ghoochani et al., 2016), d'initiation de pas (Cohen et al., 2011 ; Lord & Fitzpatrick, 2001) et de marche (van Iersel et al., 2008; Worden et al., 2016). Ainsi, peu d'éléments dans la littérature permettent d'établir si certains processus inhibiteurs, tels que l'IP ou l'IM (Nassauer & Halperin, 2003), interagissent spécifiquement avec la fonction motrice chez le jeune adulte et/ou l'adulte âgé. A ce jour, les études de Redfern et al. (2009) et de Sparto et al. (2013) permettent de discuter de l'interaction potentielle entre fonction motrice et IP / IM.

Sparto et al. (2013) ont mesuré les performances inhibitrices de sujets âgés ($N = 40$, 75 ± 5 ans) dans un contexte d'initiation de pas réactive, en réponse aux tâches d'IP et d'IM. Leurs résultats ont souligné que les TR étaient plus longs lors d'une tâche d'IM que lors d'une tâche d'IP ($p < 0.001$; TR essais IP_NC : 346 ms vs. IM_NC : 398 ms ; +15%), tandis qu'aucune différence de TR n'était observée entre les essais congruents (TR essais P_C : 294 ms, TR essais M_C : 306 ms). Un traitement central plus conséquent, plus coûteux, serait ainsi nécessaire au sujet âgé dans une telle configuration pour résoudre le conflit généré par la sélection de la réponse adaptée (IM). Néanmoins, étant donné que cette étude n'évaluait que des sujets âgés, elle n'était pas à même de rendre compte d'une potentielle évolution liée au vieillissement.

D'un point de vue corrélational, Redfern et al. (2009) ont étudié chez des sujets jeunes ($n = 24$, 25.7 ± 3.8 ans) et âgés ($n = 24$, 74.2 ± 4.4 ans) le lien potentiel entre l'IP, l'IM et l'équilibre

orthostatique; ce dernier étant évalué selon différentes configurations proprioceptives [i.e., surface d'appui stable vs. rotative] et/ou visuelles [i.e., lumière allumée vs. lumière éteinte vs. support visuel en mouvement]. Chez le sujet âgé, une corrélation a été observée entre IP et stabilité posturale⁸⁴ ($r = 0.67$, $p < 0.001$; Figure 5-A, page 80), uniquement lorsque cette dernière était évaluée dans un contexte proprioceptif perturbé. Cette corrélation souligne que, contrairement à l'IM (Figure 5-B), de moindres capacités d'IP sont associées à une instabilité posturale plus importante lorsque les entrées proprioceptives sont altérées. Aucune corrélation n'était observée chez le sujet jeune. Ainsi, il a été suggéré que, chez la personne âgée, « *la pondération sensorielle*⁸⁵ *semble impliquer une inhibition perceptive des informations proprioceptives dans les conditions où cette information est erronée* » (Redfern et al., 2009, page 574). En revanche, chez le jeune adulte, la gestion des informations proprioceptives erronées, nécessaire à une régulation posturale efficiente, ne serait pas liée à un contrôle inhibiteur spécifique.

L'objectif de ce travail est donc d'évaluer si les capacités d'IP et d'IM interagissent spécifiquement avec la fonction motrice chez le jeune adulte et/ou l'adulte âgé et notamment en présence d'un contexte proprioceptif altéré. L'hypothèse est que face à une perturbation proprioceptive, la régulation posturale de la personne âgée nécessite un traitement inhibiteur *perceptif* des informations proprioceptives erronées, contrairement à la régulation posturale du jeune adulte.

⁸⁴ Les variables quantifiant respectivement les performances d'IP et de stabilité posturale étaient le score d'IP, calculé à partir des TR obtenu lors de la tâche de conflit perceptif (score IP_{n+1} , Tableau 2, page 52) et la quantité globale de déplacement du COP dans l'axe AP [i.e., *root mean square*].

⁸⁵ Pour rappel, la pondération des informations sensorielles est un processus dynamique qui attribue à chaque signal sensoriel une valeur (un poids) reflétant sa fiabilité (cf. page 79 pour plus d'informations).

I.2. Etude 4: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice chez le jeune adulte ?

1. Hypothèse

Face à une perturbation proprioceptive, la capacité d'initiation de pas du jeune adulte est altérée mais ne nécessite pas l'intervention spécifique d'une IP ou d'une IM pour assumer la configuration présente. Pour ce faire, une tâche d'initiation de pas en réaction à des stimuli visuels manipulant l'IP ou l'IM a été proposée.

2. Méthode

2.a) Sujets

Vingt-huit sujets (18 hommes, 10 femmes, effecteur de réponse dominant : 20 droitiers, 8 gauchers, âge moyen $21 \pm 1,8$ ans), sans expérience préalable dans les tâches réalisées, ont pris part à cette étude.

2.b) Tâche de conflit perceptif ou de conflit moteur⁸⁶

Les capacités inhibitrices du sujet étaient évaluées grâce aux tâches d'IP et d'IM précédemment décrites. Lors de ces tâches, la procédure chronométrique a été programmée via le logiciel PsyScope (Cohen et al., 1993).

Debout, le sujet devait répondre en initiant un pas le plus rapidement possible à l'apparition d'une flèche dirigée vers la droite [\rightarrow] ou la gauche [\leftarrow] (réponse sur l'axe médiolatéral - *ML*, Figure 21-A et 22-A) ou vers le haut [\uparrow] ou le bas [\downarrow] (réponse sur l'axe

⁸⁶ Dans cette seconde phase expérimentale, la tâche évaluant simultanément l'IP et l'IM (IP&IM) n'a pas été réalisée car cette dernière a été conçue dans le but d'évaluer si ces deux processus mobilisent des ressources cognitives distinctes (Nassauer & Halperin, 2003). Or, au-delà de la potentielle distinction de ces processus inhibiteurs, l'objectif est désormais d'évaluer si l'IP et/ou l'IM sont spécifiquement impliquées dans la régulation proprioceptive nécessaire à une initiation de pas efficace chez le sujet jeune (et/ou âgé, *Etudes 5-6*).

antéropostérieur - AP, Figure 21-B et 22-B). Chaque essai débutait par un signal préparatoire [+ , durée 500 ms] qui apparaissait systématiquement au centre de l'écran, et déclenchait une période préparatoire d'une durée comprise entre 1000 et 2500 ms. Suite à cette période préparatoire, le signal de réponse [i.e., la flèche] apparaissait pendant 500 ms. Le sujet était parfois confronté à des signaux *pièges* [●] face auxquels il ne devait pas répondre.

→ *Evaluation de l'IP : tâche de conflit perceptif*

La flèche apparaissait à droite ou à gauche de l'écran, ou en haut ou en bas de l'écran selon l'axe de réponse considéré (Figure 21). Le sujet était confronté à des essais congruents (P_C) et non-congruents (IP_NC). **La consigne était de répondre systématiquement en fonction du sens indiqué par la flèche**, et non en fonction de sa localisation.

Lors des essais congruents, le lieu d'apparition de la flèche était en accord avec le sens qu'elle indiquait [i.e., si la flèche apparaît en haut de l'écran dirigée vers le *haut*, alors le sujet doit répondre en initiant un pas vers l'*avant*] (illustration Figure 21-B¹).

Lors des essais non-congruents, le lieu d'apparition de la flèche était en contradiction avec le sens qu'elle indiquait [i.e., si la flèche apparaît en *haut* de l'écran dirigée vers le *bas*, alors le sujet doit répondre en initiant un pas vers l'*arrière*] (illustration Figure 21-B²). Dès lors, un conflit apparaissait entre la localisation de la flèche et le sens indiqué. La résolution de ce conflit perceptif nécessitait l'inhibition de la dimension non pertinente du stimulus, à savoir sa localisation.

Cette tâche était composée de 27 essais présentés dans un ordre randomisé, dont 12 P_C, 12 IP_NC (chaque alternative était présentée six fois [ex. tâche en AP : ↑ et ↓ apparaissaient six fois en haut et six fois en bas de l'écran]) et 3 essais pièges [●].

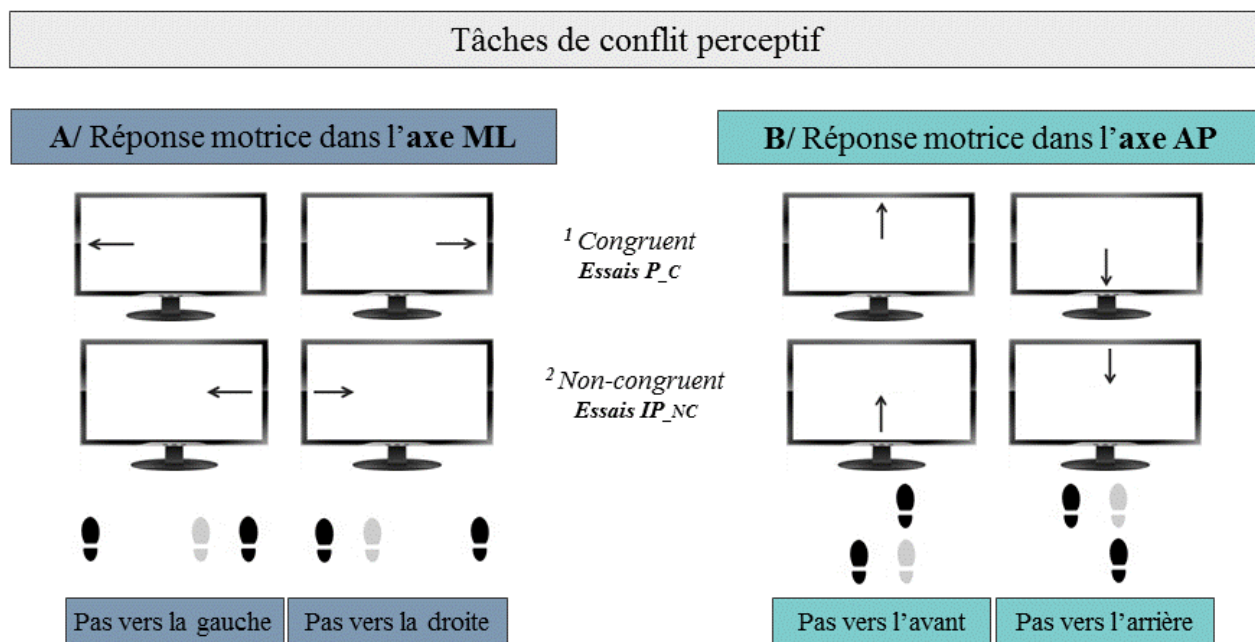


Figure 21. Illustration des tâches de conflit perceptif et des réponses attendues dans A/ l'axe médiolatéral (ML) ou dans B/ l'axe antéropostérieur (AP).

Note. IP : Inhibition perceptive; C : congruent (absence d'inhibition); NC : non-congruent (présence d'inhibition).

→ **Evaluation de l'IM : tâche de conflit moteur**

La flèche apparaissait systématiquement au centre de l'écran (Figure 22). Le sujet était confronté à des essais congruents (**M_C**) et non-congruents (**IM_NC**).

Lors des essais congruents, la réponse correspondait au sens indiqué par la flèche [i.e., si la flèche apparait dirigée vers le *bas* alors le sujet doit répondre en initiant un pas vers l'*arrière*] (Figure 22-B¹).

Lors des essais non-congruents, **la consigne était de répondre à l'inverse du sens indiqué par la flèche** [i.e., si la flèche est dirigée vers le *haut* alors le sujet doit répondre en initiant un pas vers l'*arrière*] (Figure 22-B²). Ainsi, un conflit apparaissait entre le sens indiqué et la réponse attendue. La résolution de ce conflit nécessitait l'inhibition de la sélection de la réponse dominante mais inappropriée à la consigne.

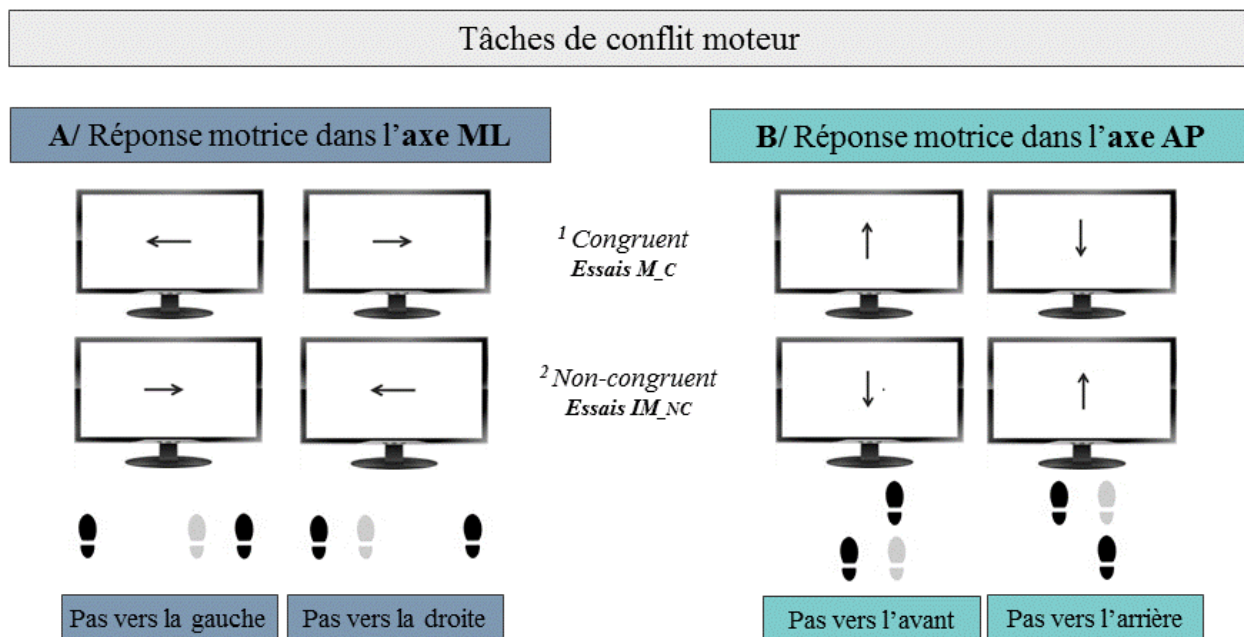


Figure 22. Illustration des tâches de conflit moteur et des réponses attendues dans A/ l'axe médio-latéral (ML) ou dans B/ l'axe antéropostérieur (AP).

Note. IM : Inhibition motrice; C : congruent (absence d'inhibition); NC : non-congruent (présence d'inhibition).

Ces tâches étaient composées de 15 essais, dont 3 essais pièges [●], présentés dans un ordre randomisé où chaque alternative [i.e., → ou ← // ↑ ou ↓] était présentée six fois.

2.c) Dispositif expérimental pour l'initiation du pas

Le dispositif mobilisé était composé d'une plateforme de force (PFF) Kistler (modèle 9286BA – fréquence d'acquisition de 1000 Hz) placée au centre d'un dispositif réalisé sur mesure (130 × 120 cm). Cette PFF était associée au logiciel BioWare 5.2.2 afin d'enregistrer la composante verticale de la force de réaction au sol⁸⁷ (F_z) et les déplacements du centre de pression⁸⁸ (en anglais Center of Pressure - COP) dans l'axe AP et ML. La PFF était synchronisée

⁸⁷ Selon la 3^{ème} loi de Newton, lorsqu'un corps exerce une force sur un autre, le second exerce toujours sur le premier une force d'intensité égale, selon la même direction mais de sens opposé.

⁸⁸ Le COP correspond au point d'application de la résultante des forces de réaction au sol : c'est le barycentre des forces de réaction verticales réparties sur l'ensemble de la surface pied-sol (Rougier, 2001; Thomas & Whitney, 1959).

avec le logiciel PsyScope par l'intermédiaire de dispositifs électroniques instrumentalisés sous chaque zone de réponse possible. Ce dispositif permettait donc au sujet d'exécuter une initiation de pas latérale vers la droite ou la gauche (Figure 23-A) ainsi que vers l'avant ou l'arrière avec le pied de son choix (Figure 23-B). La longueur du pas attendue était d'environ 30 centimètres.

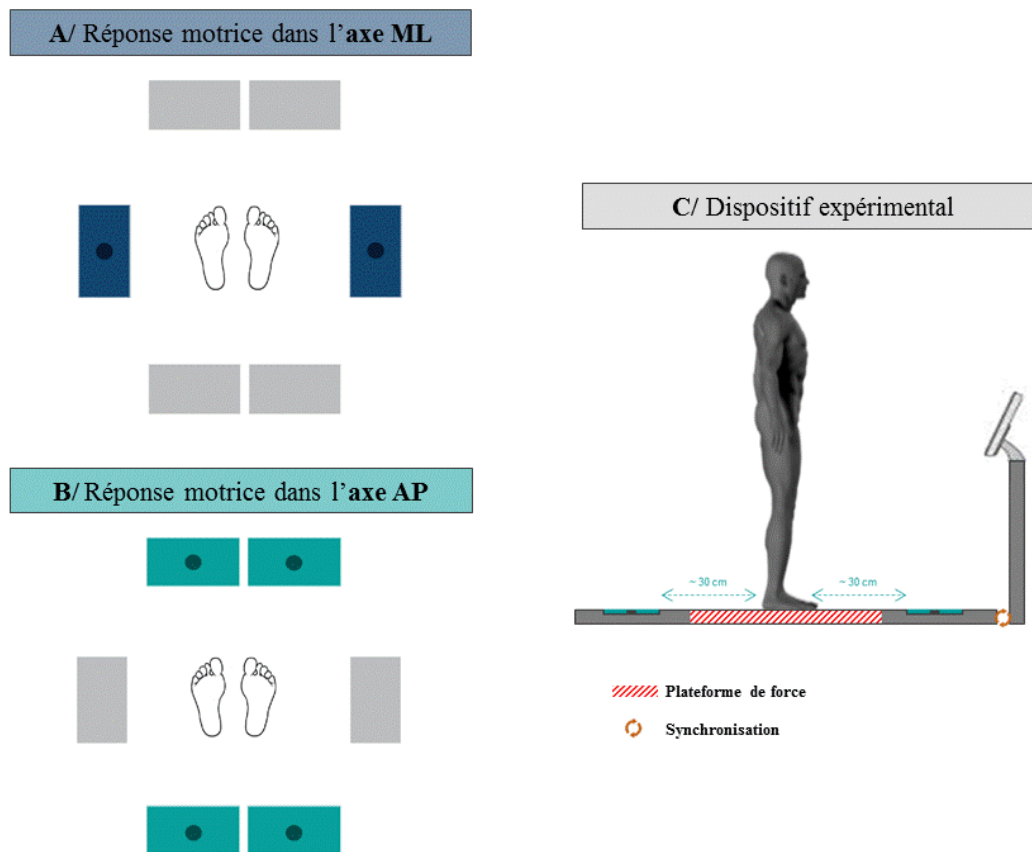


Figure 23. Illustration des zones de réponse dans A/ l'axe médio-latéral (ML) et dans B/ l'axe antéropostérieur (AP) ainsi que de C/ l'ensemble du dispositif expérimental mis en place.

2.d) Perturbation proprioceptive

La perturbation proprioceptive était induite via des VTL appliquées sur les tendons d'Achille grâce à deux vibrateurs (Vibrateur VB 115 V₂, Techno Concept, France). Ces VTL (fréquence : 80 Hz, amplitude : 0.2 mm) étaient appliquées en continu durant la réalisation de chaque tâche (durée entre 1' et 2'30) puis enlevées entre chacune d'entre elles (90 sec de repos).

2.e) Procédure

Le sujet réalisait deux sessions expérimentales sur deux jours différents dans un ordre contrebalancé entre les sujets : une session avec VTL (S_{VIB}) et une session contrôle (S_{CONT}). Lors de la S_{CONT} , le sujet était équipé des vibrateurs sans qu'ils n'émettent de vibrations. Le sujet se tenait debout sur la PFF fixant l'écran situé à un mètre et sur lequel s'affichaient les stimuli (Figure 23-C). La position des pieds était contrôlée afin de s'assurer qu'elle soit identique tout au long de la session.

Chaque session débutait par une tâche de familiarisation durant laquelle un rectangle noir apparaissait à droite, à gauche, en haut ou en bas de l'écran. Cette familiarisation était composée de 12 essais, chaque direction étant testée trois fois dans un ordre randomisé. Ensuite, les trois tâches expérimentales [i.e., tâche neutre (essais M_C), de conflit moteur (essais IM_NC), de conflit perceptif (essais P_C et IP_NC)] étaient réalisées dans un ordre contrebalancé selon les axes AP et ML⁸⁹. Le sujet réalisait donc chaque tâche quatre fois [i.e., 2 axes, 2 sessions].

De plus, au début de chaque session, l'équilibre orthostatique était évalué (avec VTL lors de la S_{VIB}) via la mesure des déplacements du COP. La consigne était de se tenir debout sur la PFF (fréquence d'acquisition 100 Hz), pieds nus, les bras le long du corps avec les pieds à la largeur des épaules en fixant du regard un repère visuel [i.e., carrée de 2 cm de diamètre] situé à une distance de deux mètres à hauteur des yeux. Chaque mesure durait 60 secondes.

2.f) Analyse des données

Equilibre orthostatique : Les données brutes du COP ont été filtrées par un filtre Butterworth passe-bas à 10 Hz (Ruhe et al., 2010). Les variables calculées étaient : l'étendue du

⁸⁹ L'ensemble des tâches était réalisé dans un axe, puis dans l'autre, l'ordre de réalisation étant également contrebalancé entre les sessions et les sujets. Une tâche cognitive n'imposait donc jamais une initiation de pas à la fois dans l'axe AP et dans l'axe ML.

déplacement du COP⁹⁰ et l'écart-type de sa position selon l'axe AP et ML (en mm), sa vitesse moyenne de déplacement (en mm/s) et son aire de déplacement (intervalle de confiance à 95%, en mm²) (Doyle et al., 2007; Moghadam et al., 2011).

Tâches de conflit : Deux variables dépendantes relatives à l'initiation du pas ont été principalement considérées⁹¹. Grâce aux données issues de la PFF, il a été possible de déterminer le **premier ajustement postural** (PAP) observé après l'apparition du signal de réponse (Rogers et al., 2003a). Ce PAP (exprimé en *ms*) est caractérisé par l'instant auquel la dérivée de la composante verticale de la force de réaction au sol (*Fz*) dépasse un seuil de 8% de sa valeur maximale. Selon certains auteurs, cette variable reflèterait le TR du sujet (Sparto et al., 2014).

La seconde variable est le **temps d'action total** (TAT - en *ms*), représentant l'intervalle de temps entre l'apparition du signal de réponse et le contact du pied sur la zone de réponse [i.e., la fin de la réponse motrice (Figure 7, page 94)], a été enregistré grâce au logiciel PsyScope.

Les valeurs médianes ont été analysées afin de minimiser l'influence d'éventuelles données extrêmes (Jennings et al., 2011). Les réponses incorrectes ont été exclues des analyses.

2.g) Analyses statistiques

Equilibre orthostatique : Afin d'évaluer l'effet des VTL sur l'équilibre du sujet, un test *t* de Student apparié (*S_{CONT}* vs. *S_{VIB}*) a été réalisé sur chacune des variables posturales considérées.

Nombres d'erreurs, PAP et TAT : Deux analyses ont été réalisées pour chacune de ces variables dépendantes. La première visait à évaluer l'impact des VTL sur la capacité inhibitrice

⁹⁰ Egaleme nt appelée le *range*, l'étendue reflète la différence entre la valeur maximale et minimale du déplacement du COP sur l'axe considéré.

⁹¹ ▲ Une troisième variable dépendante relative à l'initiation du pas : le **temps de mouvement** [i.e., intervalle de temps entre le PAP et le contact de pied sur la zone de réponse] a fait l'objet d'une analyse dans l'étude 4 et l'étude 5. Le profil de résultats obtenus était systématiquement identique à celui de la variable TAT. Ainsi, seuls les résultats relatifs à la variable TAT ont été présentés. ▲

globale [i.e., performances lors des essais non-congruents]. Ainsi, une ANOVA « globale » impliquant les facteurs *Session* (2: S_{VIB} vs. S_{CONT}), *Axe* (2: AP vs. ML) et *Inhibition* (2: Absence [moyenne des essais M_C et P_C] vs. Présence [moyenne des essais IM_NC et IP_NC]) a été réalisée.

La seconde visait à évaluer l'impact des VTL sur les capacités inhibitrices spécifiques nécessaires lors de la résolution d'un conflit perceptif (IP) ou moteur (IM). Par conséquent, une ANOVA « spécifique » impliquant les facteurs *Session* (2: S_{VIB} vs. S_{CONT}), *Axe* (2: AP vs. ML) et *Tâche cognitive* (4: neutre [essais M_C] vs. incertitude spatiale [essais P_C] vs. conflit moteur [essais IM_NC] vs. conflit perceptif [essais IP_NC]) a été réalisée sur ces trois variables dépendantes.

3. Résultats

3.a) Equilibre orthostatique

Les résultats sont résumés dans le Tableau 11. Une dégradation systématique de l'équilibre a été observée en présence de VTL (chaque $p < 0.001$).

Tableau 11. Comparaison des variables du centre de pression obtenues lors de la session contrôle et de la session vibration. Données exprimées en moyenne (écart-type)

	S_{CONT}	S_{VIB}	p
Etendue AP (mm)	19.56 (6.9)	38.82 (16.2)	< 0.001
Etendue ML (mm)	8.84 (3.6)	19.41 (6.7)	< 0.001
ET Position AP (mm)	3.74 (1.5)	6.75 (2.6)	< 0.001
ET Position ML (mm)	1.57 (0.6)	3.22 (1.2)	< 0.001
Vitesse moyenne (mm/s)	3.32 (1.2)	9.45 (4)	< 0.001
Aire (95% ellipse) (mm ²)	164.29 (114.8)	627.11 (414.3)	< 0.001

Note. S_{CONT} : session contrôle, absence de perturbation; S_{VIB_P} : application de VTL au niveau des tendons d'Achille; ML : axe médio-latéral; AP : axe antéropostérieur; ET : écart-type; p : effet *Session*.

3.b) Nombre d'erreurs

Le nombre d'erreurs était faible, quelles que soient la tâche ou la session considérée (réponses correctes : $98.3\% \pm 2.2\%$, soit 3.2 erreurs en moyenne pour un total de 192 essais). Aucune différence significative entre les tâches et les sessions n'a été révélée par l'analyse globale ou spécifique (chaque $p > 0.3$).

3.c) ANOVA globale [2(Session) × 2(Axe) × 2(Inhibition)]

PAP : L'effet *Session* ($F_{(1,27)} = 19.9, p < 0.001, \eta^2 = 0.43$) a révélé de moindres performances lors de la *S_{VIB}* par rapport à la *S_{CONT}* (320.2 ± 56.5 ms vs. 293.7 ± 43.8 ms, +9%). L'effet *Axe* ($F_{(1,27)} = 7.9, p < 0.01, \eta^2 = 0.23$) a indiqué des latences de PAP plus importantes dans l'axe AP (PAP axe ML : 300.6 ± 49.7 ms vs. PAP axe AP : 313.3 ± 53.9 ms, +4%). Enfin, l'effet *Inhibition* ($F_{(1,27)} = 47.1, p < 0.001, \eta^2 = 0.64$) a souligné des PAP plus longs en présence de conflit inhibiteur (295.4 ± 46.6 vs. 318.7 ± 54.8 ms, +8%). Aucune interaction significative n'a été observée (chaque $p > 0.4$).

TAT : L'effet *Session* ($F_{(1,27)} = 13.3, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$) a été observé, présentant des TAT plus longs lors de la *S_{VIB}* (740.5 ± 100.2 ms vs. 774.9 ± 122.9 ms, +5%). L'effet *Axe* ($F_{(1,27)} = 70.2, p < 0.001, \eta^2 = 0.72$) a révélé de meilleures performances dans l'axe ML par rapport à l'axe AP (725.9 ± 114.2 ms vs. 789.4 ± 103.2 ms, +9%). L'effet *Inhibition* ($F_{(1,27)} = 148.7, p < 0.001, \eta^2 = 0.85$) a souligné des TAT plus courts en absence de conflit inhibiteur (731.4 ± 108.7 ms vs. 784.1 ± 111.9 ms, +7%). Enfin, aucune interaction n'a été révélée (chaque $p > 0.1$).

3.d) ANOVA spécifique [2(Session) × 2(Axe) × 4(Tâche cognitive)]

Les performances de PAP et de TAT obtenues dans chaque axe lors de la *S_{CONT}* et la *S_{VIB}* sont résumées Tableau 12 (page 172).

PAP : L'ANOVA a mis en évidence un effet principal *Session* ($F_{(1,27)} = 19.5, p < 0.001, \rho\eta^2 = 0.42$), caractérisé par des PAP plus longs en présence de VTL (293.8 ± 47.5 ms vs. 319.7 ± 61.5 ms, +9%). Un effet *Axe* ($F_{(1,27)} = 7.6, p < 0.01, \rho\eta^2 = 0.22$) a révélé des PAP plus courts dans l'axe ML (300.5 ± 53.1 ms vs. 312.9 ± 58.9 ms, +4%). Enfin, un effet *Tâche cognitive* ($F_{(3,81)} = 20.6, p < 0.001, \rho\eta^2 = 0.43$) a été observé. Les analyses post-hoc ont rapporté une différence significative des PAP entre chaque tâche cognitive ($p > 0.05$), à l'exception des tâches de conflit perceptif (essais IP_NC) et de conflit moteur (essais IM_NC) ($p > 0.6$) (Figure 24, Tableau 12-A). Aucune interaction significative n'a été observée (chaque $p > 0.2$).

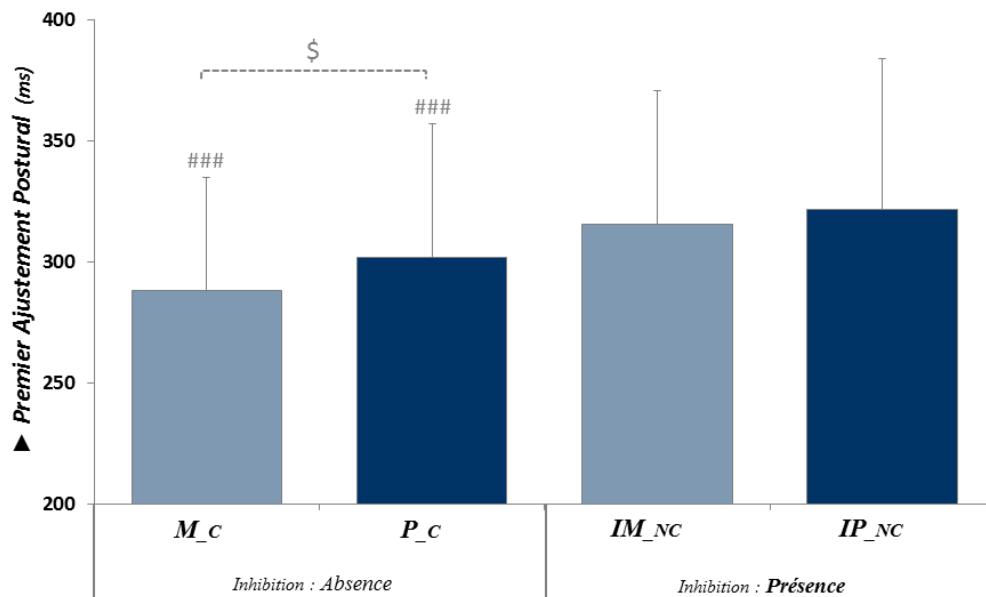


Figure 24. Evolution du premier ajustement postural en fonction de la tâche cognitive réalisée.

Note. Les barres d'erreurs représentent les écart-types. IP_NC : tâche de conflit perceptif (inhibition); IM_NC : tâche de conflit moteur (inhibition); P_C : tâche d'incertitude spatiale; M_C : tâche neutre; ### : différence significative avec les tâches de conflit inhibiteur ($p < 0.05$); \$: $p < 0.05$.

TAT : Cette analyse spécifique a révélé un effet des facteurs *Session* ($F_{(1,27)} = 13.3, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$) et *Axe* ($F_{(1,27)} = 70.2, p < 0.001, \eta^2 = 0.73$), soulignant des TAT plus longs lors de la *S_{VIB}* (740.5 ± 104 ms vs. 774.9 ± 126 ms, +5%) et sur l'axe AP (725.9 ± 117.9 ms vs. 789.4 ± 107.3 ms, +9%). De plus, l'effet principal *Tâche cognitive* ($F_{(3,81)} = 59.1, p < 0.001, \eta^2 = 0.69$) a révélé une différence significative entre les TAT obtenus dans chacune des tâches réalisées (chaque $p < 0.05, TAT_{IP_NC} > TAT_{IM_NC} > TAT_{P_C} > TAT_{M_C}$) (Figure 25, Tableau 12-B).

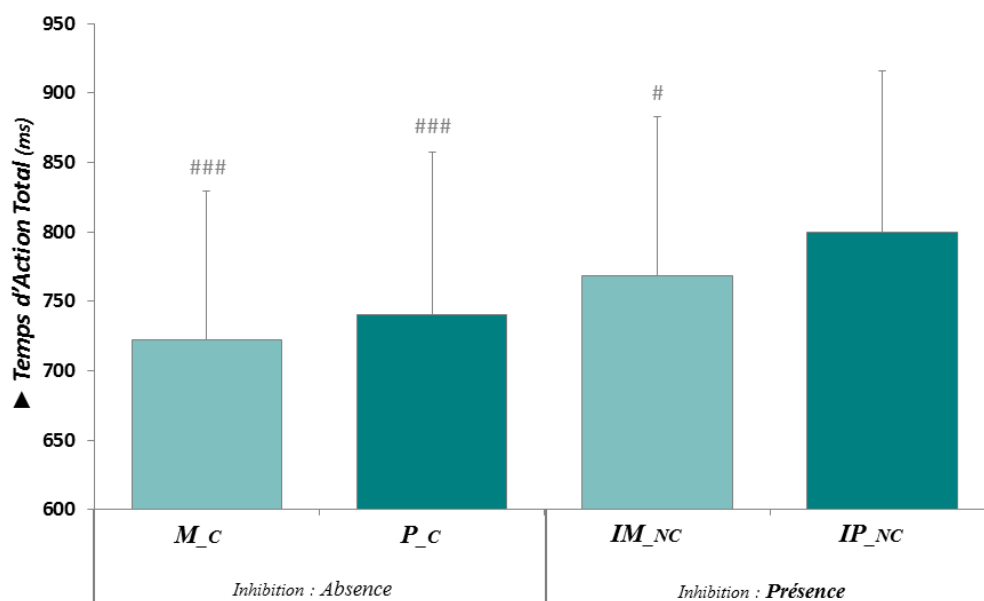


Figure 25. Evolution du temps d'action total en fonction de la tâche cognitive réalisée.

Note. Les barres d'erreurs représentent les écart-types. *IP_NC* : tâche de conflit perceptif (inhibition); *IM_NC* : tâche de conflit moteur (inhibition); *P_C* : tâche d'incertitude spatiale; *M_C* : tâche neutre; ### : différence significative avec la tâche de conflit perceptif [i.e., essais *IP_NC*] ($p < 0.001$); # : différence significative avec la tâche de conflit perceptif ($p < 0.05$).

Tableau 12. Présentation des valeurs du A/ premier ajustement postural et du B/ temps d'action total obtenus lors de chaque tâche cognitive sur les axes antéropostérieur (AP) et médio-latéral (ML) lors de chaque session expérimentale. Données moyennes (écart-type) exprimées en ms.

A/ Premier Ajustement Postural					
Inhibition	Tâche	Axe AP		Axe ML	
		Contrôle	VIBRATION	Contrôle	VIBRATION
Absence	Neutre Essais M_C	284.02 (44.6)	307.41 (58.3)	274.64 (32.7)	286.23 (43.5)
	Incertitude spatiale Essais P_C	294.2 (51.9)	320.49 (57.8)	278.59 (43.6)	314.71 (57.9)
Présence	Conflit Moteur Essais IM_NC	306.16 (46.6)	330.29 (62.3)	297.68 (44.4)	327.32 (61.3)
	Conflit Perceptif Essais IP_NC	316.09 (55.3)	344.64 (73.7)	296.81 (48.3)	328.68 (62.3)
B/ Temps d'Action Total					
Inhibition	Tâche	Axe AP		Axe ML	
		Contrôle	VIBRATION	Contrôle	VIBRATION
Absence	Neutre Essais M_C	742.86 (82.1)	761.81 (110.1)	678.02 (94.4)	706.21 (121.7)
	Incertitude spatiale Essais P_C	749.07 (102.1)	807.21 (113.9)	684.52 (99.4)	721.13 (121.5)
Présence	Conflit Moteur Essais IM_NC	787.46 (82.1)	819.09 (117.1)	713.64 (102.1)	752.16 (128.6)
	Conflit Perceptif Essais IP_NC	807.13 (99.08)	841.04 (116.2)	761.61 (107.8)	790.38 (131.9)

4. Discussion

Cette étude évaluait chez le jeune adulte la contribution des processus d'IP et d'IM dans l'initiation réactive du pas réalisé dans un contexte proprioceptif perturbé. Conformément à l'hypothèse avancée, l'application de VTL au niveau des tendons d'Achille a engendré une dégradation de performances [i.e., allongement du PAP et du TAT], sans pour autant impacter spécifiquement les capacités d'IP et d'IM. Ce résultat suggère que la charge attentionnelle associée à la gestion de cette perturbation proprioceptive n'implique pas spécifiquement de contrôle inhibiteur chez le jeune adulte.

4.a) Effet des vibrations sur l'initiation du pas

Le contrôle postural statique des sujets était dégradé en présence de VTL. Il est reconnu qu'une telle perturbation engendre des informations proprioceptives erronées (cf. Figure 18, page 137) nécessitant ainsi une régulation posturale plus contrôlée, coûteuse en attention (Courtine et al., 2001). Etant donné la perturbation vibratoire appliquée en continue lors des tâches d'initiation de pas, l'implication d'un contrôle central de la posture serait à l'origine, au moins en partie, des moindres performances observées lors de la S_{VIB} . Cet argument est en accord avec les résultats de Lin et al. (2015). En effet, ces auteurs ont évalué le TRC_2 de sujets jeunes ($n = 20$, 24.6 ± 2.4 ans) et âgés ($n = 20$, 75.4 ± 6 ans) en position bipodale avec et sans VTL appliquées au niveau de la taille. Leurs résultats ont mis en évidence que, même si une augmentation plus importante était observée chez les adultes âgés ($p < 0.001$), l'ensemble des sujets voyait leurs TRC_2 augmenter ($p < 0.01$, +16%) lorsque les informations proprioceptives étaient modifiées. Cette augmentation du TR illustrerait la charge attentionnelle additionnelle requise en présence de VTL pour la réalisation de la tâche (Lin et al., 2015).

4.b) Effet de l'axe sur l'initiation du pas

Cette perturbation proprioceptive affectait dans la même mesure la planification (PAP) et l'exécution (TAT) du pas dans les axes ML et AP, bien que de moindres performances aient été observées dans l'axe AP. Cet effet principal *Axe*⁹² est en accord avec la littérature, qui soulignait par exemple que la réalisation d'une tâche cognitive [ex. compter à rebours] dans une position bipodale amenait à une déstabilisation posturale dans l'axe AP uniquement (Pellecchia, 2003). Dans le cas d'application de VTL au niveau des tendons d'Achille, ce résultat peut être en partie attribué aux déplacements spécifiques du COP générés dans cet axe par la contraction des muscles fléchisseurs plantaires en réponse à leur étirement illusoire induit par les VTL (Figure 18, page 137) (Barbieri et al., 2008; Ceyte et al., 2007; Dettmer et al., 2013; Roll et al., 1989; Thompson et al., 2007).

4.c) Effet de l'inhibition sur l'initiation du pas

En accord avec la littérature (Bédard et al., 2010; Potocanac et al., 2015; Sparto et al., 2014a), l'effet principal *Inhibition* a révélé de moindres performances de PAP et de TAT lors des tâches nécessitant la résolution d'un conflit inhibiteur. Cet allongement de performances illustre le coût attentionnel associé à l'implication de l'inhibition face à un tel conflit.

Néanmoins, la présence de VTL a impacté les PAP et TAT dans la même mesure lors des tâches nécessitant [i.e. essais non-congruents], ou non [i.e. essais congruents], un contrôle inhibiteur. En effet, l'absence d'interaction *Session * Inhibition* indique que cette perturbation vibratoire a affecté la performance de ces sujets indépendamment des exigences inhibitrices. Ce résultat suggère que, chez le jeune adulte, la présence de VTL au niveau des tendons d'Achille

⁹² Etant donné les résultats similaires obtenus dans l'étude 5 et de la dimension secondaire de cet effet par rapport aux objectifs de cette thèse, l'effet du facteur principal *Axe* ne sera plus discuté dans la suite de ce manuscrit.

n'influence pas spécifiquement le coût attentionnel associé aux tâches d'inhibition. Ainsi, comme abordé précédemment, la dégradation de performances observée lors de la S_{VIB} s'expliquerait principalement par un coût attentionnel accru associé à la régulation posturale, quelle que soit la tâche considérée.

Au-delà de cet effet principal *Inhibition* révélé par l'analyse statistique « globale », l'effet principal *Tâches cognitives* a souligné des PAP équivalents lors de la résolution d'un conflit perceptif (essais IP_NC) et d'un conflit moteur (essais IM_NC), tandis qu'une différence significative apparaissait entre les essais congruents (PAP essais M_C < PAP essais P_C) (Figure 24). Cette dégradation significative des performances lors des essais P_C par rapport aux essais neutres (M_C) est vraisemblablement engendrée par la complexité plus importante liée à l'incertitude spatiale [i.e., apparition de la flèche à droite ou à gauche de l'écran] présente uniquement dans la tâche de conflit perceptif.

Concernant la perturbation proprioceptive induite, il s'avère qu'elle a impacté dans la même mesure les performances de PAP et de TAT, que ces dernières soient réalisées en présence d'un conflit perceptif (essais IP_NC) ou moteur (essais IM_NC). Ainsi, ces processus inhibiteurs ne semblent pas être spécifiquement impliqués dans la régulation posturale du jeune adulte lorsque ce dernier doit faire face à une perturbation proprioceptive. Ce résultat semble en accord avec les analyses corrélationnelles de Redfern et al. (2009) qui ne rapportaient aucun lien chez le sujet jeune entre les capacités d'IP, d'IM et de contrôle postural, quelle que soit la configuration proprioceptive considérée.

En conclusion, cette étude a permis de mettre au point une tâche d'initiation de pas en réaction à la résolution de conflits cognitifs de nature perceptive (IP) ou motrice (IM), associée pour la première fois à une perturbation proprioceptive via des VTL au niveau des tendons

d'Achille. Les résultats ont révélé que l'altération du contexte proprioceptif affecte les performances du jeune adulte et ce, indépendamment de la mise en jeu de processus inhibiteurs. Une augmentation significative du coût attentionnel en présence de VTL est observée quelle que soit la charge attentionnelle inhibitrice, suggérant ainsi que cette augmentation est principalement liée à la complexité de la régulation posturale associée. Enfin, en l'absence d'impact spécifique des VTL sur les performances d'IP et d'IM, les résultats obtenus s'accordent à ceux rapportés par Redfern et al. (2009) chez le jeune adulte.

Etude 4. En quelques mots

- *Chez le jeune adulte, la régulation posturale ne nécessite aucun contrôle inhibiteur spécifique quel que soit le contexte proprioceptif.*



Confirmation des suggestions de Redfern et al. (2009).

- *La dégradation de performances en présence de vibrations serait liée à une augmentation du coût attentionnel associé au contrôle postural.*

Et maintenant : L'âge avancé amène-t-il à une implication spécifique de l'inhibition dans la régulation posturale en fonction du contexte proprioceptif ?

I.3. Etude 5: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice au cours de l'avancée en âge ?

1. Hypothèse

L'hypothèse avancée est que, contrairement au jeune adulte, **la régulation posturale de la personne âgée face à une perturbation proprioceptive nécessite une inhibition *perceptive* des informations proprioceptives erronées**. Ainsi, des sujets jeunes et âgés ont réalisé une tâche d'initiation de pas réactive, identique à celle de l'étude 4, dans le cadre d'une recherche biomédicale intitulée STEP'INH⁹³.

2. Méthode

2.a) Sujets

Cinquante-deux sujets (24 hommes et 28 femmes, âge moyen $45,3 \pm 24,1$ ans) ont volontairement pris part à cette étude. Aucun d'entre eux n'avait d'expérience préalable dans les tâches réalisées. Parmi ces sujets, 26 d'entre eux étaient étudiants à l'Université de Nantes (12 hommes et 14 femmes, effecteur de réponse dominant : 20 droitiers et 6 gauchers, âge moyen $22,5 \pm 2,5$ ans) et constituaient le groupe « *jeunes adultes* » (âge < 30 ans, noté **G_JA**).

Recrutés par le biais de diverses associations nantaises, les 26 sujets du groupe « *adultes âgés* » (âge > 65 ans, noté **G_AA**) étaient retraités (12 hommes et 14 femmes, effecteur de réponse dominant : 22 droitiers et 4 gauchers, âge moyen $70,1 \pm 3,3$ ans) (voir Tableau 13 la composition de chaque groupe, pages 186-187). Chaque sujet du **G_AA** a déclaré n'avoir subi aucune chute dans les douze mois précédant l'inclusion.

⁹³ Recherche biomédicale « *Etude du processus d'inhibition cognitive chez la personne âgée* », autorisation du comité de protection des personnes Ouest IV de Nantes n°2015-A01042-47, version du 7 septembre 2016. Cette recherche est financée par le projet « *Longévité, Mobilité, Autonomie* ».

2.b) Tâche de TRS et de TRC₂

Le sujet se tenait debout et devait répondre lorsqu'un rectangle noir apparaissant au centre (TRS) ou à droite ou à gauche de l'écran (TRC₂). La réponse attendue était une initiation du pas latérale la plus rapide possible sur la zone de réponse droite ou gauche en fonction de l'effecteur de réponse dominant (TRS) ou selon la latéralisation du stimulus présenté (TRC₂). Chacune de ces tâches était composée de 20 essais.

Un essai débutait par l'apparition du signal préparatoire [+] au centre de l'écran pour une durée de 500 ms. Suite à une période préparatoire comprise entre 1000 et 2500 ms, le signal de réponse était affiché à l'écran jusqu'à la réponse du sujet. L'intervalle inter-essais était compris entre 4500 et 5500 ms, permettant ainsi au sujet de retrouver sa position initiale.

2.c) Tâche de conflit perceptif ou de conflit moteur

Les tâches mobilisées [i.e., tâche neutre (essais M_C), conflit moteur (essais IM_NC), conflit perceptif (essais P_C et IP_NC)] étaient identiques à celles réalisées lors de l'étude 4 (cf. pages 161-164).

2.d) Dispositif expérimental pour l'initiation du pas

Le dispositif utilisé était le même que celui de l'étude 4. Un dispositif de sécurité [i.e., un harnais veste – illustré Figure 26] était à la disposition des sujets âgés. Si un sujet s'équipait du harnais, il lui était demandé de le garder tout au long de l'expérimentation.

2.e) Perturbation proprioceptive

La perturbation proprioceptive mobilisée dans cette étude était identique à celle de l'étude 4 (cf. page 165).

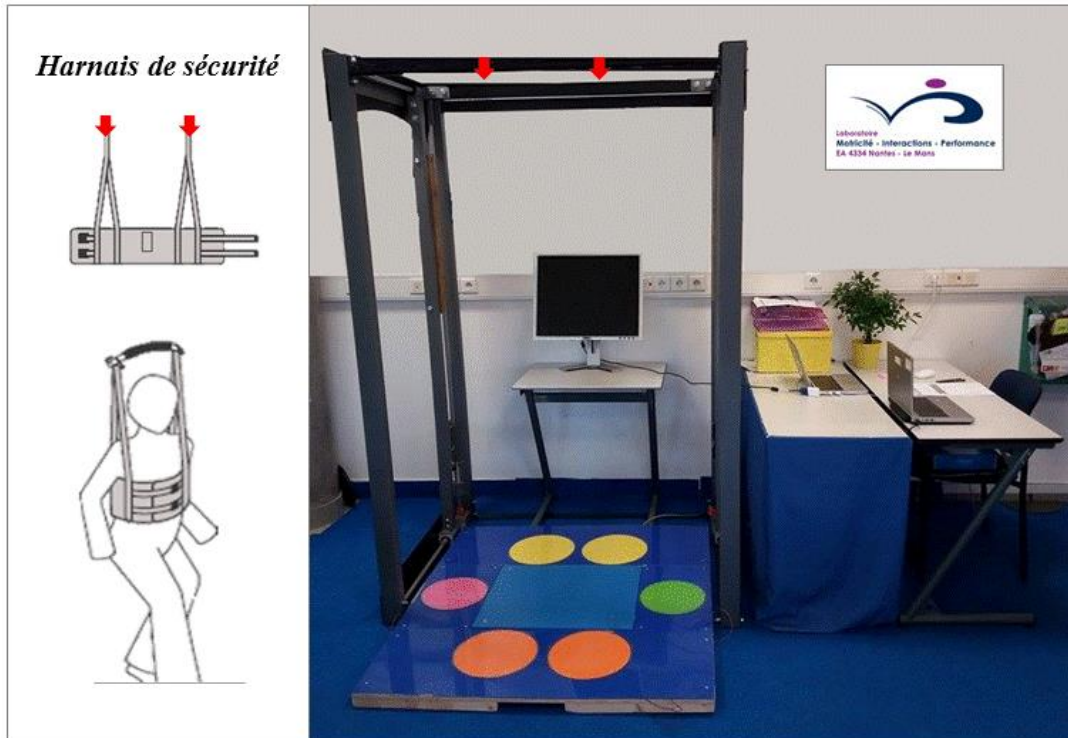


Figure 26. Illustration du dispositif expérimental et du dispositif de sécurité mis en place.

2.f) Procédure

Tous les sujets du *G_JA* et du *G_AA* ont réalisé deux sessions expérimentales sur deux jours différents.

Lors de la **Session 1**, l'objectif était d'évaluer le statut cognitif et exécutif du sujet, ainsi que son niveau général d'activité [ex. activité physique, loisirs].

Statut cognitif. Evalué grâce au score obtenu au questionnaire Mini-Mental State Examination (*MMSE*), le statut cognitif constituait un critère d'inclusion [i.e., score minimal de 25 sur 30]. Ce questionnaire nécessite d'accomplir des tâches simples et de formuler des réponses courtes aux questions posées. Les éléments évalués sont relatifs à : l'orientation (ex. « *en quelle saison sommes-nous ?* »), l'enregistrement (« *répétez les trois mots entendus* »), l'attention et au calcul (« *comptez à partir de 100 en retirant 7 à chaque fois* »), la rétention mnésique (tâche de

rappel), au langage (ex. « *quel est le nom de cet objet ?* ») ainsi qu'à la praxie de construction (« *recopiez ce dessin* ») (Folstein et al., 1975).

Statut exécutif. Les fonctions exécutives ont été évaluées par l'intermédiaire de tests issus de la batterie GREFEX⁹⁴ (Godefroy et al., 2010, 2014), cette dernière offrant un ensemble d'outils validés et normalisés pour une population francophone (Godefroy et al., 2008). Une tâche d'empan de chiffres a également été réalisée.

- ▲ Le **test de Stroop** (Stroop, 1935) permet d'évaluer les capacités inhibitrices. Ce test est composé des trois tâches suivantes : 1/ dénomination de la couleur des rectangles présentés (Dénomination), 2/ lecture de noms de couleurs écrits en noir (Lecture) et 3/ dénomination de la couleur d'encre des noms de couleurs présentés (Interférence). Quelle que soit la tâche, la consigne est de lire/nommer le plus d'items possibles en 45 secondes.
- ▲ Le **Trail-Making Test** (Army Individual Test Battery, 1944) évalue la rapidité perceptivo-cognitivo-motrice (tâche A et B) ainsi que la flexibilité mentale (tâche B). La tâche A consiste à relier des nombres allant de 1 à 25 dans un ordre croissant, le plus rapidement possible sans soulever la pointe du stylo de la feuille. Selon les mêmes consignes, la tâche B consiste à relier dans un ordre croissant des nombres allant de 1 à 12 mais également des lettres de A à L, en alternant systématiquement un nombre et une lettre (ex. 1-A-2-B...). Pour chaque tâche, le temps de réalisation, le nombre d'erreurs commises ainsi que le nombre de « levée de stylo » ont été rapportés.
- ▲ Deux **tâches de fluence verbale** (Milner, 1964) ont été réalisées. Lors de chacune d'elles, l'objectif est de formuler le plus d'items possibles en deux minutes. La première tâche consistait en une évocation lexicale formelle [i.e., donner le plus de mots français possible

⁹⁴ Le Groupe de Réflexion et d'Evaluation des Fonctions Exécutives (GREFEX) est coordonné par le Professeur Godefroy (Amiens) ainsi que par le Professeur Pillon (Paris la Salpêtrière).

commençant par la lettre P (nom, verbe, adjectif...) tandis que la seconde consistait en une évocation lexicale sémantique [i.e., donner le plus de noms d'animaux possible].

▲ Le **test de Brixton** (Burgess & Shallice, 1996) permet d'évaluer la capacités de déduction et de maintien de règles opératoires du sujet. La tâche consistait à prédire le déplacement d'un cercle noir au sein de dix espaces disponibles et fixes, la réponse étant indiquée par l'acquisition d'une règle spécifique. La performance du sujet est évaluée par le nombre total d'erreurs commises, c'est-à-dire lorsque le déplacement du cercle ne suivait pas la règle en cours, ainsi que par le nombre spécifique d'erreurs d'anticipation [i.e., changement de stratégie de déplacement en amont d'un changement de règle].

▲ Une **tâche d'empan de chiffres** (Wundt, 1912) mesure la capacité d'assimilation de l'information en mémoire à court terme. L'empan mnésique représente le nombre maximal de chiffres qu'un sujet peut restituer immédiatement après les avoir entendus. La première étape nécessitait que le sujet restitue les chiffres dans leur ordre de présentation (empan endroit). La seconde étape nécessitait que le sujet les restitue dans l'ordre inverse [ex. si l'expérimentateur déclare « 6 – 2 – 9 », alors le sujet répond « 9 – 2 – 6 »] (empan envers). Plus le nombre de chiffres restitué est important, plus la performance mnésique est importante. Cette dernière est illustrée par le score obtenu lors de chaque type d'empan [note maximale à l'empan endroit : 16 (2×8 niveaux), à l'empan envers : 14 (2×7 niveaux)] ainsi que par un score total illustrant la somme des deux empan, noté sur 30.

Niveau général d'activité. Inspiré du questionnaire de Baecke (Baecke et al., 1982), l'auto-questionnaire d'activité physique (AQAP) a permis de rendre compte du niveau de dépense physique hebdomadaire habituel grâce à un score allant de 1 (niveau faible) à 3 (niveau important). Egalement, le nombre d'heures par semaine passées à pratiquer une activité sportive a été rapporté. Uniquement complété par les sujets du *G_AA*, un score d'occupation multi-

domaines (en anglais Multidomain Occupational Usefull Score - *MOUS*) a permis d'établir le niveau de participation du sujet âgé aux conversations, à des activités manuelles [ex. jardinage], de loisirs intellectuels [ex. lecture, jeux de cartes] et hors du domicile [ex. cinéma, association de retraité], grâce à des échelles allant de 0 (pas du tout) à 10 (très fréquemment). Ainsi, plus le score obtenu est élevé (maximum 40), plus le sujet est considéré comme actif. Enfin, un questionnaire évaluant la peur de chuter au cours de seize situations du quotidien [ex. en faisant le ménage, prenant une douche] a été complété [i.e., Fall Efficacy Scale (Tinetti et al., 1990)]. Chacune de ces situations était évaluée par un score allant de 1 (pas du tout inquiet) à 4 (très inquiet). Ainsi, le score total était compris entre 16 et 64, où moins important était le score, moins la peur de faire une chute au quotidien était présente.

Lors de la **Session 2**, le protocole était divisé en quatre étapes :

Etape 1/ Equilibre orthostatique : Evalué sans et avec application de VTL au niveau des tendons d'Achille [*CONT vs. VTL*]. Chaque mesure durait 60 secondes, suivie par 90 secondes de repos assis sur une chaise, selon le même dispositif et consignes décrits dans l'étude 4 (cf. page 166).

Etape 2/ Evaluation du TR : Lors des tâches de TRS, TRC₂, neutre (essais M_C), conflit perceptif (essais P_C et IP_NC) et de conflit moteur (essais IM_NC) en position bipodale statique. Les réponses attendues étaient manuelles [i.e., pression du pouce sur le bouton tenu dans la main droite ou sur celui tenu dans la main gauche]. Chaque tâche durait une à deux minutes, suivie par 90 secondes de repos.

Etapes 3/ et 4/ Initiation de pas : L'étape 3 débutait par une tâche de familiarisation identique à celle décrite dans l'étude 4 (cf. page 166). Par la suite, ces deux dernières étapes étaient identiques, à l'exception que l'une d'entre elle était réalisée avec VTL [i.e., **VIB** vs.

CONT, ordre contrebalancé entre les sujets]. L'ensemble des tâches cognitives susmentionnées était réalisé en mobilisant une initiation de pas la plus rapide possible, dans l'axe ML (Figure 21-A et 22-A, respectivement page 163 et 164) ou dans l'axe AP (Figure 21-B et 22-B). Chaque tâche durait entre 1' et 2'30'' et était suivie par 90 secondes de repos au minimum. Pour chaque sujet, ces deux dernières étapes étaient espacées par 30 minutes de repos, notamment afin de limiter l'influence posturale des VTL lorsque celles-ci étaient appliquées lors de l'étape 3. En effet, les VTL au niveau des tendons d'Achille sont reconnues pour induire des modifications posturales, majoritairement des déséquilibres accrus dans l'axe AP, et ce, même une fois la stimulation arrêtée (Duclos et al., 2007; Roll & Vedel, 1982; Roll et al., 1989). Plus précisément, il a été montré que ces effets *post-VTL*⁹⁵ diminuent progressivement et s'observent jusqu'à 8-10 minutes en moyenne après l'arrêt des VTL (Wierzbicka et al., 1998).

2.g) Analyse des données

Les variables dépendantes étaient identiques à celles abordées lors de l'étude 4, à savoir : le **premier ajustement postural (PAP)** observé après l'apparition du stimulus, reflétant le TR du sujet (Sparto et al., 2014) et le **temps d'action total (TAT)** (cf. page 167-168). Ces variables ont été extraites pour chacune des tâches cognitives réalisées : TRS, TRC₂, neutre (essais M_C), conflit perceptif (essais P_C et IP_NC) et de conflit moteur (essais IM_NC).

2.g) Analyses statistiques

Statut cognitif, statut exécutif, niveau d'activité et TR manuels : Afin de caractériser l'effet du vieillissement sur ces variables, un test *t* de Student (*G_JA* vs. *G_AA*) a été réalisé.

⁹⁵ Ces résultats ont été rapportés suite à une stimulation vibratoire identique à celle de cette présente étude [i.e., VTL amplitude : 0.2 mm, fréquence 80 Hz] chez des sujets âgés de 23 à 59 ans.

Equilibre orthostatique : Afin d'évaluer l'effet de l'âge sur l'impact des VTL sur l'équilibre, une ANOVA impliquant le facteur *Age* (2: *G_JA* vs. *G_AA*) et *Vibration* (2: Absence vs. Présence) a été réalisée sur différents paramètres posturaux (cf. pages 166-167).

PAP et TAT :

→ **Tâches de TRS et TRC₂**⁹⁶ : Une ANOVA impliquant les facteurs *Age* (2: *G_JA* vs. *G_AA*) et *Vibration* (2: *CONT* vs. *VIB*) a été réalisée sur les PAP et les TAT issus de ces tâches.

→ **Tâches de conflit** : Deux analyses distinctes ont été réalisées.

Une ANOVA « globale » impliquant les facteurs *Age* (2: *G_JA* vs. *G_AA*), *Vibration* (2: *CONT* vs. *VIB*), *Axe* (2: *AP* vs. *ML*) et *Inhibition* (2: Absence [moyenne des essais *M_C* et *P_C*] vs. Présence [moyenne des essais *IM_NC* et *IP_NC*]) a été réalisée sur les PAP et les TAT.

Une ANOVA « spécifique » impliquait les facteurs *Age* (2: *G_JA* vs. *G_AA*), *Vibration* (2: *CONT* vs. *VIB*), *Axe* (2: *AP* vs. *ML*) et *Tâche cognitive* (4: neutre [essais *M_C*] vs. incertitude spatiale [essais *P_C*] vs. conflit moteur [essais *IM_NC*] vs. conflit perceptif [essais *IP_NC*]).

3. Résultats

3.a) Statut cognitif, statut exécutif, niveau d'activité et TR manuels

L'ensemble des données récoltées lors de la **Session 1** et les comparaisons statistiques associées est résumé dans le Tableau 13.

Conformément aux normes GREFEX, aucun des sujets inclus ne présentait de déficience exécutive (Godefroy et al., 2010). De plus, la moyenne des performances exécutives des sujets âgés se situait dans le meilleur quartile de leur tranche d'âge (cf. Annexe 2 – page 228). Enfin, les sujets âgés inclus étaient particulièrement actifs d'un point de vue physique et social.

⁹⁶ Pour rappel, ces deux tâches étaient réalisées uniquement dans l'axe ML.

Tableau 13. Illustration des caractéristiques de chaque groupe ainsi que des mesures issues des tests cognitifs et des questionnaires fonctionnels réalisés.
Données exprimées en moyenne (écart-type).

		<i>Jeunes adultes</i> <i>n = 26</i>	<i>Adultes âgés</i> <i>n = 26</i>	<i>p</i>
Caractéristiques générales				
	Hommes / Femmes	12 / 14	12 / 14	
	Age (ans)	22.5 (2.5)	70.1 (3.3)	
	Taille (cm)	171.4 (10.1)	166.9 (9.1)	
	Poids (kg)	65.4 (11.7)	67.2 (9.8)	
	Score MMSE (/30)	29.4 (0.8) [min 28]	29.1 (1.3) [min 25]	NS
Tests cognitifs				
Stroop (nombre d'items en 45 sec)	Lecture	127.9 (13.9)	104.6 (13.5)	***
	Dénomination	94.8 (11)	76.4 (10)	***
	Interférence	61.7 (10.4)	36.7 (8.2)	***
	Score interférence [!]	33.1 (7.7)	39.7 (9.8)	**
TMT	A – Temps de réalisation (sec)	16.9 (3.8)	29.9 (8.9)	***
	Nombre d'erreurs	0.26 (0.4)	0.12 (0.4)	NS
	Nombre de levées de crayon	0.08 (0.3)	0.38 (0.6)	*
	B – Temps de réalisation (sec)	43 (18.2)	68.9 (24.9)	***
	Nombre d'erreurs	0.41 (0.8)	0.92 (1.2)	*
	Nombre de levées de crayon	0.37 (0.6)	1.1 (1.3)	*
Fluence verbale	Lettre P (nombre d'items)	25.3 (4.4)	26.1 (5)	NS
	Animaux (nombre d'items)	34.9 (6.7)	35.6 (7.4)	NS
Empan de chiffre	Endroit (max 16)	10 (1.2)	8.7 (1.8)	**
	Envers (max 14)	7.2 (1.9)	6.1 (1.8)	*
	Total (max 30)	17.2 (2.8)	14.8 (3.1)	**
Brixton	Nombre d'erreurs total	23.7 (3.9)	29.8 (4.3)	***
	Nombre d'anticipations	3.9 (2.6)	4.5 (2.6)	NS

Questionnaires fonctionnels				
AQAP	Niveau d'AP (entre 1 et 3)	2.4 (0.5)	2.7 (0.5)	NS
	Nombre d'heures d'AP	3.1 (1.8)	3.9 (1.2)	NS
	Score MOUS (max 40)	-	32.3 (4.4)	-
	Peur de chuter (entre 16 et 64)	-	19.8 (4.6)	-
Tâches de TR - Réponses manuelles, position : debout (ms)				
	Temps de réaction simple	257.1 (21.9)	340.2 (75.2)	***
	Temps de réaction de choix	297.3 (29.6)	390.4 (57.9)	***
	Neutre (essais M_C)	375.8 (50.1)	501.5 (73.3)	***
	Incertitude spatiale (essais P_C)	457.9 (78.4)	702.3 (138.1)	***
	Conflit moteur (essais IM_NC)	455.9 (77.6)	770.9 (150.5)	***
	Conflit perceptif (essais IP_NC)	504.3 (87.5)	813.7 (211.8)	***

Note. MMSE : questionnaire mini-mental state examination; AQAP : auto-questionnaire d'activité physique; MOUS : multidomain occupational usefull score; AP : activité physique. *** : $p < 0.001$; ** : $p < 0.01$; * : $p < 0.05$. NS : effet Age non-significatif; ! : le score d'interférence illustre la capacité inhibitrice du sujet face à l'effet Stroop (différence entre le nombre d'items formulé lors de l'épreuve de *Dénomination* et d'*Interférence*).

3.b) Equilibre orthostatique

Les résultats statistiques sont résumés Tableau 14.

Seule l'analyse de l'étendue du déplacement du COP dans l'axe ML a mis en évidence un effet du facteur *Age* ($F_{(1,50)} = 8323.4$, $p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.28$), révélant une étendue plus importante chez le sujet jeune ($G_{AA} : 11.2 \pm 4.9$ mm vs. $G_{JA} : 13.2 \pm 6.2$ ms, +18%). Un effet du facteur *Vibration*, soulignant des performances altérées en présence de VTL, a été systématiquement observé (chaque $p < 0.01$). Enfin, l'analyse de trois variables a révélé une interaction *Age* * *Vibration*, chacune rapportant les mêmes observations (exemple d'illustration Figure 27). Plus précisément, aucune différence entre les performances du sujet jeune et âgé n'était observée lors de l'évaluation CONT (chaque $p > 0.4$). Les VTL engendraient une altération de performances à la fois chez le sujet jeune (chaque $p < 0.001$) et le sujet âgé (chaque $p < 0.01$). Néanmoins, une

différence significative a été observée entre les performances du sujet jeune et âgé en présence de VTL (chaque $p < 0.05$), avec une dégradation plus importante observée chez le sujet jeune.

Tableau 14. Résultats statistiques (valeurs de p) issus de l'analyse de variance menée sur les différentes variables du centre de pression.

	<i>Effets principaux</i>			<i>Comparaisons post-hoc</i>		
	<i>Age</i>	<i>VIB</i>	<i>Age * VIB</i>	CONT: JA vs. AA	VTL: JA vs. AA	Pour JA & AA: CONT vs. VTL
Etendue AP (mm)	NS	< 0.001	< 0.01	> 0.4	< 0.05	< 0.01
Etendue ML (mm)	< 0.001	< 0.01	NS	-	-	-
ET Position AP (mm)	NS	< 0.001	NS	-	-	-
ET Position ML (mm)	NS	< 0.001	< 0.01	> 0.9	< 0.01	< 0.001
Vitesse moyenne (mm/s)	NS	< 0.001	< 0.01	> 0.7	< 0.05	< 0.001
Aire (95% ellipse) (mm ²)	NS	< 0.01	NS	-	-	-

Note. **NS** : non significatif; ML : axe médio-latéral; AP : axe antéropostérieur; ET : écart-type; CONT : évaluation sans vibrations; VLT : évaluation avec vibrations sur les tendons d'Achille; JA : jeunes adultes; AA : adultes âgés.

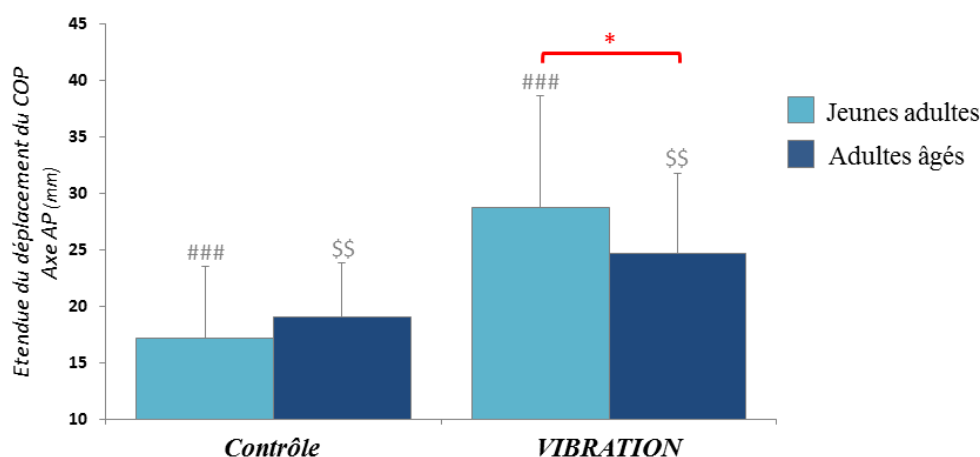


Figure 27. Illustration de l'interaction *Age * Vibration* ($p < 0.01$) obtenue sur l'étendue du déplacement du centre de pression (COP) sur l'axe AP.

Note. Les barres représentent les écart-types. ### : différence entre l'évaluation sans et avec VTL chez le jeune adulte ($p < 0.001$); §§ : différence entre l'évaluation sans et avec VTL chez l'adulte âgé ($p < 0.01$); * : différence entre le sujet jeune et âgé lors de l'évaluation avec VTL.

3.c) PAP et TAT

Les résultats statistiques des ANOVA relatives aux PAP et aux TAT résumés ci-après sont présentés en détail dans le Tableau 16⁹⁷ (cf. page 195).

→ Tâche de TRS

PAP et TAT : Les analyses ont révélé un effet des facteurs *Age* et *Vibration*, soulignant de moindres performances chez le sujet âgé (**PAP** : 202.9 ± 45.8 ms vs. 239.4 ± 66.1 ms, +18% ; **TAT** : 624.8 ± 100.6 ms vs. 717.5 ± 139.3 ms, +15%) et en présence de VTL (**PAP** : 203.6 ± 51.7 ms vs. 238.8 ± 61.8 ms, +17%; **TAT** : 641.6 ± 115.4 ms vs. 700.8 ± 137.1 ms, +9%). Les interactions *Age* * *Vibration* n'étaient pas significatives ($p > 0.6$).

→ Tâche de TRC₂

PAP : Un effet *Age* a rapporté des PAP plus longs chez le sujet âgé (226.9 ± 42.3 ms vs. 270.9 ± 41.3 ms, +19%). Bien que l'effet *Vibration* n'ait pas été significatif ($p > 0.1$), l'interaction *Age* * *Vibration* a révélé que les VTL allongeaient les latences de PAP uniquement chez le sujet jeune ($p < 0.05$, PAP *CONT* : 214 ± 38.7 ms vs. PAP *VIB* : 239.8 ± 42.5 ms, +12%). En effet, aucune différence n'était observée chez le sujet âgé ($p > 0.9$, PAP *CONT* : 274.2 ± 39.2 ms vs. PAP *VIB* : 267.7 ± 43.8 ms).

TAT : Les effets des facteurs *Age* et *Vibration* ont révélé des TAT allongés chez le sujet âgés (670.8 ± 105.7 ms vs. 832.5 ± 157.4 ms, +24%) et en présence de VTL (713.5 ± 133.2 ms vs. 789.8 ± 169.1 ms, +11%). L'interaction *Age* * *Vibration* n'était pas significative ($p > 0.6$).

⁹⁷ Pour plus de clarté par rapport à l'hypothèse testée, les effets relatifs au facteur principal *Axe* n'ont pas été rapportés dans le Tableau 16. Par ailleurs, aucune interaction faisant intervenir ce facteur n'a été révélée par les analyses réalisées (chaque $p > 0.3$).

→ **Tâches de conflit - ANOVA globale** [2 (Age) × 2 (Session) × 2 (Axe) × 2 (Inhibition)]

PAP : L'analyse a révélé un effet de l'Age, soulignant de meilleures performances chez le sujet jeune (300.1 ± 61.8 ms) par rapport au sujet âgé (390.1 ± 61.8 ms, +30%). Egalement, l'effet principal *Inhibition* a mis en évidence de moindres performances de PAP en présence de conflit inhibiteur (320.6 ± 72.2 vs. 369.6 ± 90.6 ms, +15%). Les effets principaux *Vibration* ($p > 0.4$) et *Axe* ($p > 0.3$) n'étaient quant à eux pas significatifs.

Une interaction *Age * Vibration* ($p < 0.05$) a été révélée. Plus spécifiquement, même si les PAP du sujet jeune étaient significativement plus courts que ceux du sujet âgé en configuration *CONT* ($p < 0.001$) et *VIB* ($p < 0.001$), les VTL ont engendré une dégradation de performance chez le sujet jeune ($p < 0.05$) tandis qu'aucune différence n'était observée chez le sujet âgé ($p > 0.4$) (Figure 28). Aucune autre interaction n'a été révélée ($p > 0.1$).

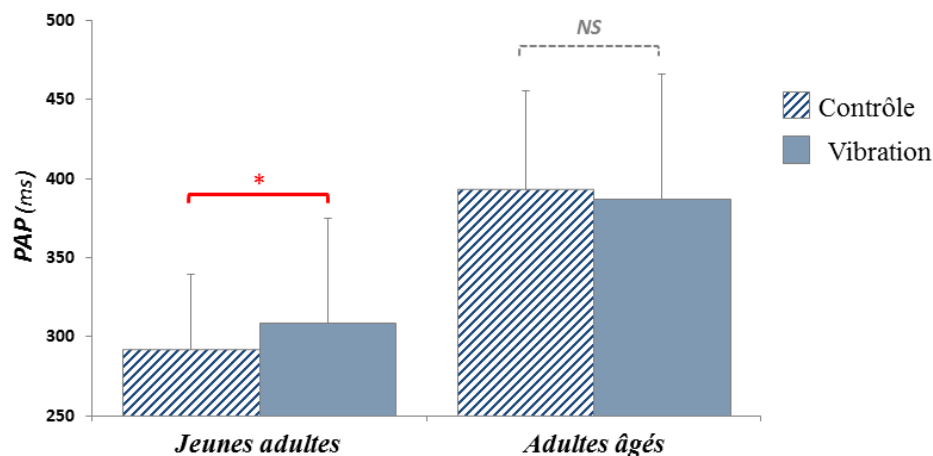


Figure 28. Evolution du premier ajustement postural lors des tâches de conflit en fonction du groupe et du contexte proprioceptif.

Note. Les barres d'erreur représentent les écart-types. PAP : premier ajustement postural. * : $p < 0.05$; NS : non-significatif. Il est important de préciser que les PAP des jeunes adultes sont significativement plus courts que ceux des sujets âgés quel que soit le contexte proprioceptif ($p < 0.001$).

TAT : L'effet *Age* a rapporté des TAT plus courts chez le sujet jeune (800.3 ± 107.9 ms) par rapport au sujet âgé (1050.3 ± 176.9 ms, +31%). L'ensemble des effets principaux *Vibration*, *Axe* et *Inhibition* était significatif, révélant ainsi des TAT plus longs en présence de VTL (901.5 ± 191.1 vs. 954.6 ± 194.7 ms, +6%), sur l'axe AP (950.6 ± 194.2 vs. 905.5 ± 192.6 ms, +5%) et en présence d'un conflit inhibiteur (877.9 ± 167.2 vs. 977.9 ± 206.9 ms, +11%).

L'interaction *Age* * *Inhibition* ($p < 0.001$) a révélé que la présence d'un conflit inhibiteur engendrait des TAT plus importants quel que soit l'âge, bien que le sujet jeune soit systématiquement plus performant que le sujet âgé (chaque $p < 0.001$) (Figure 29).

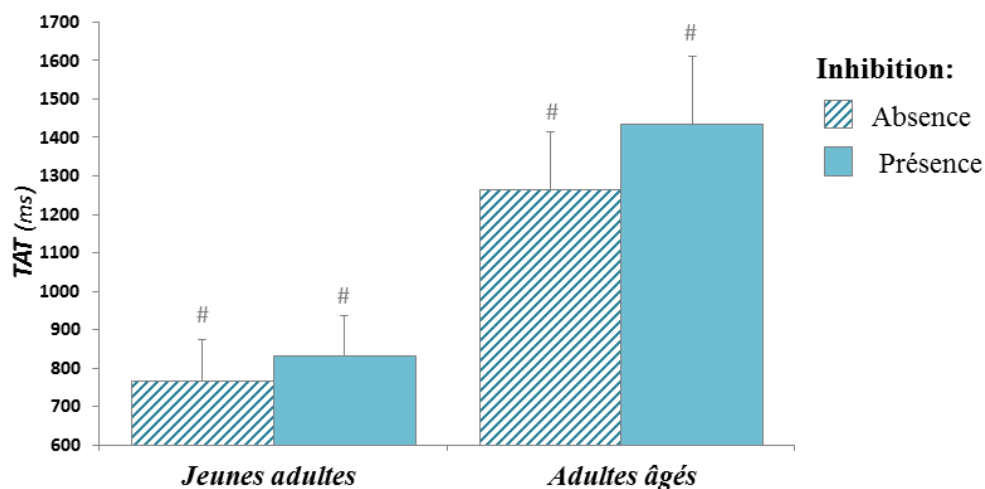


Figure 29. Evolution du temps d'action total lors des tâches de conflit en fonction du groupe et du contexte proprioceptif.

Note. Les barres d'erreur représentent les écart-types. TAT : temps d'action total. # : $p < 0.001$ pour chaque comparaison.

→ **Tâches de conflit - ANOVA spécifique** [2 (*Age*) × 2 (*Session*) × 2 (*Axe*) × 4 (*Tâche cognitive*)]

PAP : L'effet du facteur *Age* a souligné des PAP plus longs chez le sujet âgé (300.6 ± 64.8 ms vs. 389.8 ± 92.9 ms, +30%). L'effet *Tâche cognitive* a également été rapporté. Les comparaisons post-hoc ont révélé une différence entre les PAP obtenus lors des deux tâches

« sans conflit » ($p < 0.01$, essais M_C : 309.2 ± 70.8 vs. essais P_C : 331.1 ± 81.7 ms, +7%), tandis qu'aucune différence significative n'était observée lors des tâches « conflit » ($p > 0.9$, essais IM_NC : 373.9 ± 100.6 vs. essais IP_NC : 366.5 ± 95.6 ms) (Figure 30-A). Ainsi, aucune différence n'était observée entre les performances issues de la tâche mesurant l'IP et celle mesurant l'IM. Les effets principaux *Vibration* et *Axe* n'étaient pas significatifs (chaque $p > 0.4$).

Seule l'interaction *Age * Tâche cognitive* a été rapportée. Les comparaisons post-hoc ont mis en évidence que le sujet jeune était systématiquement plus performant que le sujet âgé (chaque $p < 0.001$), et que la présence du conflit perceptif ou moteur allongeait systématiquement les PAP quel que soit l'âge (chaque $p < 0.001$). Aucune différence significative entre les tâches « sans conflit » (essais M_C et P_C) n'a été observée, autant chez le sujet jeune que le sujet âgé ($p > 0.1$). Enfin, aucune différence entre les tâches de conflit perceptif et moteur n'a été observée chez le sujet jeune ($p > 0.9$) et chez le sujet âgé ($p > 0.9$) (Figure 30-B).

TAT : Les résultats révélés par cette analyse spécifique étaient quasiment identiques à ceux obtenus sur les données de PAP présenté ci-dessus. La seule différence portait sur l'observation des effets *Vibration* et *Axe*, soulignant des TAT plus longs en présence de VTL (+6%) et sur l'axe AP (+6%).

Ainsi, les effets principaux sont présentés dans le Tableau 15-A, tandis que les comparaisons post-hoc relatives à l'effet *Tâche cognitive* et à l'interaction *Age * Tâche cognitive* sont rapportées dans le Tableau 15-B.

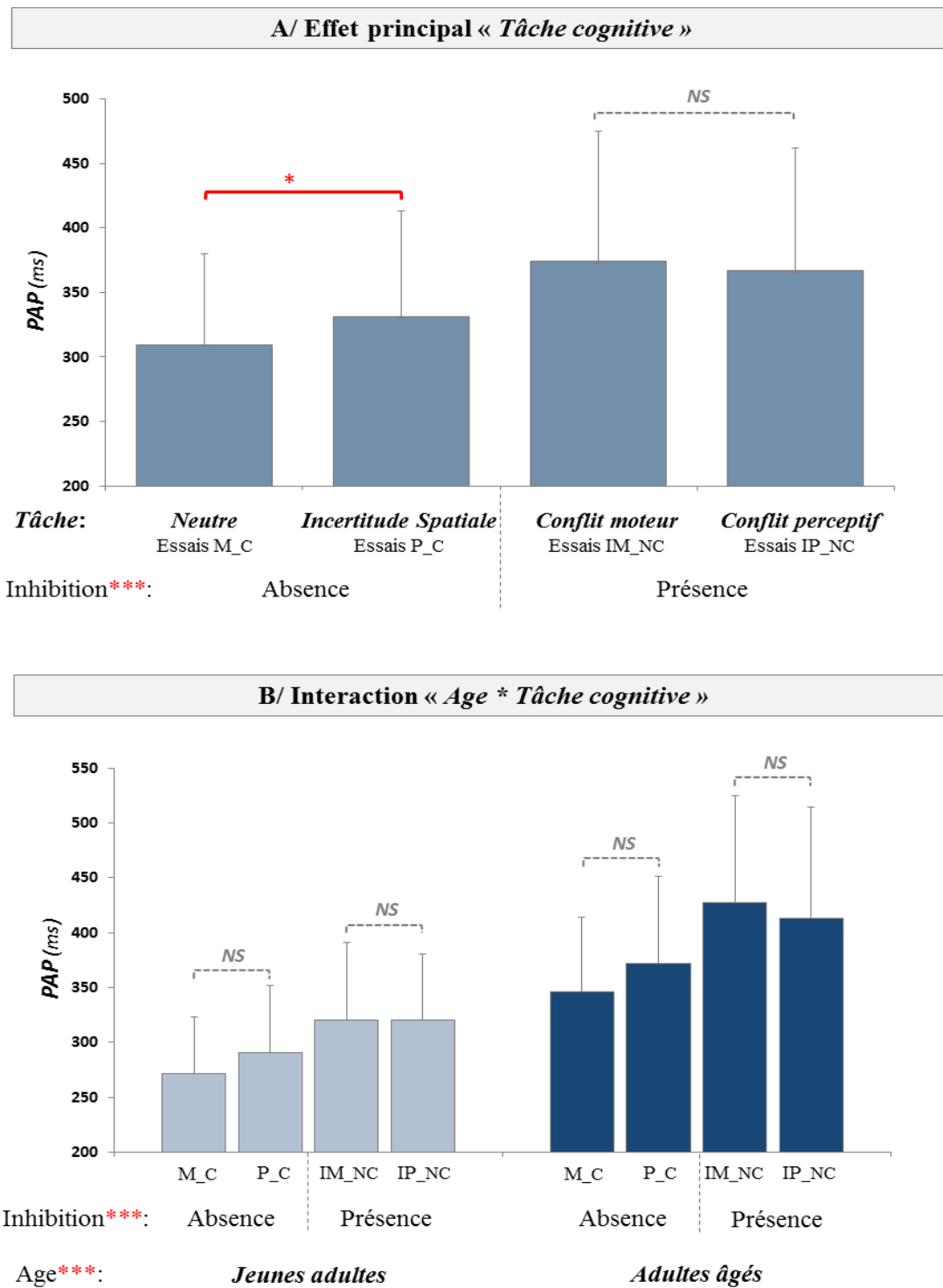


Figure 30. Illustration de A/ l'effet Tâche cognitive ($p < 0.001$) et de B/ l'interaction Age * Tâche cognitive ($p < 0.05$) obtenus sur les valeurs de premier ajustement postural (PAP) lors des tâches de conflit.

Note. Les barres d'erreur représentent les écart-types. * : $p < 0.05$; *** : $p < 0.001$; NS : non-significatif.

Tableau 15. Présentation de l'analyse de variance « spécifique » relative au temps d'action total avec A/ les effets principaux et des interactions obtenus et B/ les comparaisons post-hoc réalisées.

A/	<i>F</i>	<i>p</i>	$p\eta^2$	Valeurs moyennes (ET) (ms)
Effets principaux				
Age (<i>G_JA vs. G_AA</i>)	56.7	< 0.001	0.53	803.8 (115.1) vs. 1059.8 (187.8)
Vibration (<i>CONT vs. VIB</i>)	35.2	< 0.001	0.41	906.3 (198.3) vs. 957.2 (201.9)
Axe (<i>AP vs. ML</i>)	42.6	< 0.001	0.46	958.1 (201.6) vs. 905.5 (198.4)
Tâche cognitive	115.9	< 0.001	0.69	M_C : 868.5 (172.2) < P_C : 892.8 (178.6) < IM_NC : 977.7 (215.5) = IP_NC : 988.2 (195.6)
Interactions				
Age * Tâche cognitive	15.1	< 0.001	0.23	-
Autres	-	NS	-	-
B/ Comparaisons post-hoc				
Effet principal « Tâche cognitive »				
P_C vs. M_C	IP_NC vs. IM_NC	P_C vs. IP_NC	M_C vs. IM_NC	
<i>p</i> < 0.001 >	NS =	<i>p</i> < 0.001 <	<i>p</i> < 0.001 <	
Interaction « Age * Tâche cognitive »				
P_C vs. M_C	IP_NC vs. IM_NC	P_C vs. IP_NC	M_C vs. IM_NC	JA vs. AA
NS =	NS =	<i>p</i> < 0.001 <	<i>p</i> < 0.001 <	<i>p</i> < 0.001 <

Note. ET : écart-type; P_C : tâche d'incertitude spatiale; M_C : tâche neutre; IP_NC : tâche de conflit perceptif; IM_NC : tâche de conflit moteur; JA : jeunes adultes; AA : adultes âgés; **NS** : non-significatif.

Tableau 16. Illustration des résultats statistiques obtenus lors des analyses de variance globales et spécifiques menées sur le premier ajustement postural et le temps d'action total, en fonction de la tâche réalisée.

		TRS	TRC ₂	Tâches de conflit	
				ANOVA globale	ANOVA spécifique
<i>Premier ajustement postural</i>	Age	F(1,50) = 19.9, <i>p</i> < 0.01, $\eta^2 = 0.13$	F(1,50) = 22.3, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.31$	F(1,50) = 33.6, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.40$	F(1,50) = 34.3, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.42$
	Vibration	F(1,50) = 26.6, <i>p</i> < 0.01, $\eta^2 = 0.35$	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	Inhibition ou Tâche cognitive			F(1,50) = 115.6, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.70$	F(3,150) = 52.6, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.53$
	<i>Age * Vibration</i>	<i>NS</i>	F(1,50) = 6.1, <i>p</i> < 0.01, $\eta^2 = 0.11$	F(1,50) = 4, <i>p</i> < 0.05, $\eta^2 = 0.08$	<i>NS</i>
	<i>Age * Tâche cognitive</i>			<i>NS</i>	F(3,150) = 2.8, <i>p</i> < 0.05, $\eta^2 = 0.06$
	<i>Autre interaction</i>			<i>NS</i>	<i>NS</i>
<i>Temps d'action total</i>	Age	F(1,50) = 8.8, <i>p</i> < 0.01, $\eta^2 = 0.15$	F(1,50) = 22.4, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.31$	F(1,50) = 61.5, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.56$	F(1,50) = 56.7, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.53$
	Vibration	F(1,50) = 29.4, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.37$	F(1,50) = 45.5, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.48$	F(1,50) = 33, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.40$	F(1,50) = 35.2, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.41$
	Inhibition ou Tâche cognitive			F(1,50) = 414.8, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.89$	F(3,150) = 115.9, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.69$
	<i>Age * Vibration</i>			<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>Age * Tâche cognitive</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	F(1,50) = 56.1, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.53$	F(3,150) = 15.1, <i>p</i> < 0.001, $\eta^2 = 0.23$
	<i>Autre interaction</i>			<i>NS</i>	<i>NS</i>

Note. TRS : tâche de temps de réaction simple; TRC₂ : tâche de temps de réaction de choix à deux alternatives (signal de réponse : rectangle); ANOVA : analyse de variance; *NS* : non-significatif.

4. Discussion

Cette étude visait à évaluer si le vieillissement amenait à un contrôle inhibiteur spécifique de la planification (PAP) et l'exécution (TAT) d'un pas initié dans un contexte proprioceptif perturbé. Ainsi, l'initiation du pas en réponse à différentes tâches de TR manipulant – ou non – un conflit cognitif, a été évaluée chez des sujets jeunes et âgés avec et sans VTL au niveau des tendons d'Achille. Contrairement à l'hypothèse formulée, aucune implication spécifique de l'IP n'a été observée dans la régulation posturale de la personne âgée, quel que soit le contexte proprioceptif. Néanmoins, il a été mis en évidence que, contrairement au jeune adulte, l'application de VTL n'impactait pas la planification de son pas [i.e., performances de PAP].

4.a) Effets de l'âge sur l'initiation du pas

Un effet systématique de l'âge sur les performances de PAP et de TAT a été rapporté, quelle que soit la tâche cognitive testée (Tableau 16). En effet, de moindres performances ont été observées chez le sujet âgé, à l'instar de différentes études évaluant l'initiation de pas en réponse à une tâche de TRS (Cohen et al., 2011; Rogers et al., 2001), de TRC₂ (Di Fabio et al., 2005; Sparto et al., 2014b; St George et al., 2007) et/ou d'inhibition (Potocanac et al., 2015; Sparto et al., 2014a; Uemura et al., 2016). Cette dégradation serait liée pour l'essentiel à une augmentation du coût attentionnel associé à l'initiation de pas réactive chez le sujet âgé (Brown et al., 1999; Prado et al., 2007; Redfern et al., 2002). L'allongement du PAP serait notamment la conséquence des différentes atteintes cognitives liées à l'avancée en âge (cf. Tableau 13, pages 186-187), tels que le déclin des fonctions exécutives (Salthouse, 1996) et le ralentissement de la vitesse de traitement (Sheppard and Vernon, 2008; Zajac & Nettelbeck, 2016). Quant à l'allongement du TAT, il pourrait résulter d'un transfert du poids plus lent engendré par les déficits

neuromusculaires⁹⁸ liés au vieillissement (Patla et al., 1993) ainsi que d'une production d'ajustements posturaux anticipés erronés⁹⁹ (Cohen et al., 2011 ; Uemura et al., 2013, 2016).

4.b) Effets des vibrations sur le PAP → évolution spécifique avec l'âge

Un impact spécifique des VTL a été observé sur les PAP du jeune adulte. Plus précisément, lors de la réalisation des tâches de TRC₂ et de conflit, les VTL ont engendré des latences de PAP plus importantes chez le sujet jeune tandis qu'aucun impact n'a été observé chez le sujet âgé par rapport à l'évaluation *contrôle*. Il est important de préciser qu'un tel profil de résultats n'a pas été rapporté sur les PAP issus de la tâche de TRS (Tableau 16). En effet, seuls les effets principaux avaient été révélés, soulignant alors un impact négatif des VTL sur les PAP quel que soit l'âge. L'interaction *Age * Vibration* rapportée uniquement par l'analyse des PAP des tâches de TRC₂ et de conflit suggère ainsi que la complexité de la tâche cognitive modulerait le contrôle de la perturbation proprioceptive chez le sujet âgé. Face à une tâche de TRS, moins coûteuse en attention, le sujet âgé est impacté dans la même mesure que le sujet jeune par les VTL. Or, dès qu'il réalise une tâche plus complexe cognitivement, plus coûteuse, la présence de VTL n'impacte pas davantage la planification de son pas. Une telle observation apparaît en désaccord avec les nombreuses études ayant rapporté qu'une augmentation de la complexité des tâches cognitives et/ou posturales est associée à une augmentation du coût attentionnel, capturée par une augmentation des TR (ici PAP) (Bernard-Demanze et al., 2009; Lajoie et al., 1996). De plus, une moindre disponibilité des informations sensorielles est reconnue augmenter la demande attentionnelle associée à la régulation posturale chez la personne âgée (Shumway-Cook &

⁹⁸ Par exemple, diminution de la masse et de la force musculaire (Cooper et al., 2015; Maden-Wilkinson et al., 2015). Voir page 58 pour plus de détails.

⁹⁹ Pour rappel, un *ajustement postural anticipé erroné* reflète la production d'une dynamique posturale dans le sens contraire à la réponse attendue (Cohen et al., 2011). Voir pages 71-72 pour plus d'informations.

Woollacott, 2000; Teasdale et al., 1993). Suite aux résultats spécifiques obtenus dans cette présente étude lors de la réalisation des tâches de TRC₂ et de conflit, deux interprétations peuvent être avancées.

→ *Posture et vibrations : une moindre perturbation avec l'âge ?*

Il est possible que l'absence d'effet du facteur *Vibration* sur le PAP du sujet âgé soit le reflet d'une moindre sensibilité aux VTL avec l'âge.

En effet, bien qu'une moindre stabilité orthostatique ait été systématiquement observée en présence de VTL (cf. Tableau 14, page 188), aucun effet spécifique de l'âge n'était rapporté. Seule l'exception d'une étendue de déplacement du COP dans l'axe ML moins importante (plus stable) a été soulignée chez le sujet âgé. Il est important de préciser que ce résultat s'oppose à de nombreux travaux qui ont mis en évidence un déclin de la stabilité posturale avec l'âge (Abrahamová & Hlavacka, 2008; Hay et al., 1996; Prieto et al., 1996), notamment à partir de 60 ans (Pyykkö et al., 1988b). De plus, l'interaction *Age * Vibration* indiquait que l'impact des VTL était plus important pour le sujet jeune que pour le sujet âgé (Tableau 14, Figure 27). Autrement dit, bien que leurs performances posturales soient équivalentes dans un contexte proprioceptif neutre, une instabilité posturale plus importante était observée chez les sujets jeunes en présence de cette perturbation proprioceptive spécifique.

Les travaux ayant évalué l'effet du vieillissement sur les variables du COP en présence de VTL au niveau des tendons d'Achille sont rares. Ces derniers ont rapporté que les VTL affectaient dans la même mesure les sujets jeunes et âgés (Abrahámová et al., 2009). Par exemple, bien que leurs sujets âgés ($n = 9$, 69.5 ± 3.5 ans) présentaient des variables de COP altérées [i.e., $p < 0.01$, vitesse et étendue plus importantes] par rapport à leurs sujets jeunes ($n = 10$, 24.6 ± 8.3 ans), et que la présence de VTL altérait ces variables [ex. vitesse moyenne du

COP : sans VTL : 9.2 mm/s vs. avec VTL : 15.5 mm/s, $p < 0.01$], Hay et al. (1996) n'ont pas observé d'interaction entre les facteurs *Age* et *Vibration*.

Le moindre impact de ces VTL chez la personne âgée pourrait être attribué aux altérations du système nerveux central et/ou périphérique observées au cours du vieillissement. Parmi ces altérations, une atteinte des fibres myélinisées au niveau de la voie lemniscale¹⁰⁰, responsable de la sensibilité vibratoire, a par exemple été rapportée d'un point de vue central (Tanosaki et al., 1999; Verdú et al., 2000). D'un point de vue périphérique, une dégénérescence et une diminution du nombre de récepteurs proprioceptifs ont été couramment observées (Goble et al., 2009; Liu et al., 2005; Kararizou et al., 2005; Swash & Fox, 1972). Par ailleurs, le fait que la régulation posturale de l'adulte âgé repose davantage sur les afférences visuelles et vestibulaires que sur les afférences proprioceptives (Eikema et al., 2012; Perrin et al., 1997) pourrait également avoir participé à ce résultat.

→ *Tâche de TRC₂ et tâches de conflit : une surcharge attentionnelle avec l'âge ?*

Il est possible que les tâches de TRC₂ et de conflit soient tellement complexes et coûteuses en attention pour le sujet âgé, que l'ajout de VTL n'affecte pas davantage sa capacité à planifier sa réponse.

Le contrôle postural du jeune adulte est plus automatique, moins coûteux attentionnellement que celui de la personne âgée (Woollacott & Shumway-Cook, 2002). Il semble alors pertinent d'avancer que davantage de ressources attentionnelles sont nécessaires au sujet âgé pour maintenir un équilibre orthostatique semblable à celui du jeune adulte (Tableau 14). Dès lors, par rapport à ce dernier, le sujet âgé alloue une quantité de ressources

¹⁰⁰ Egalement appelée voie cordonale postérieure, la *voie lemniscale* véhicule la sensibilité épicrotique [i.e., tact fin], proprioceptive consciente et vibratoire, du cordon postérieur de la moelle épinière jusqu'au cortex somesthésique (cortex pariétal primaire) (Johnson et al., 2008).

attentionnelles beaucoup plus importante à la planification de sa réponse motrice (Figure 28, page 190) qui, couplée à sa moindre sensibilité aux VTL, n'est pas affectée par l'altération du contexte proprioceptif présent. A contrario, lors de ces tâches cognitives, le jeune adulte dispose d'une réserve attentionnelle importante qui, au vue de sa sensibilité proprioceptive, est utilisée en présence de VTL afin de conserver un niveau de performance relativement élevé. Ainsi, contrairement à la tâche de TRS, la complexité de la configuration testée lors des tâches de TRC₂ et de conflit semble amener à une planification tellement contrôlée de sa réponse que la modification du contexte proprioceptif n'engendre pas de *surcoût* attentionnel pour le sujet âgé.

4.c) Effets des vibrations sur le TAT

Le TAT se trouve systématiquement affecté par la présence de VTL, quels que soient l'âge et la tâche cognitive (Tableau 16). Ainsi, chez le sujet âgé, l'impact des VTL s'observe uniquement sur l'étape d'exécution du pas et non sur sa planification.

Un rôle significatif est conféré aux informations issues des afférences Ia dans le contrôle du mouvement, notamment lors des phases de simple appui (Ivanenko et al., 2000). Il a par exemple été mis en évidence que l'application d'une perturbation vibratoire au niveau des tendons d'Achille conduit à une diminution de la vitesse de marche (Verschueren et al., 2002b), soutenant ainsi l'adoption d'une stratégie implicite de protection face à l'instabilité perçue (Nutt et al., 1993). Concernant la phase de simple appui, une dégradation spécifique [i.e., altération position, déplacement, accélération du COP dans l'axe AP et ML] a été rapporté lors d'une tâche d'évitement d'obstacle exécuté avec VTL (Sorensen et al., 2002). Il est reconnu que cette altération illustre la nécessité d'un moment de force plus important pour contrôler les déséquilibres posturaux encourus (Winter et al., 1998). Ainsi, une modification du comportement

mécanique est opérée afin de faire face à cette perturbation proprioceptive spécifique (Sorensen et al., 2002).

Le TAT plus important observé en présence de VTL dans cette présente étude serait ainsi le reflet de la modification des stratégies motrices mises en place pour exécuter de manière réactive et sécurisée la réponse attendue.

4.d) Effet de l'inhibition sur l'initiation du pas

En présence d'inhibition, une dégradation des performances de PAP et de TAT a été observée (Tableau 16). Cet effet *Inhibition* (ou *Tâche cognitive* selon l'analyse considérée) est en accord avec Sparto et al. qui sont, à ce jour, les seuls à avoir évalués l'initiation de pas en réponse à des tâches spécifiques d'IP (Sparto et al., 2014a) et d'IM (Sparto et al., 2013). Le coût attentionnel supplémentaire associé au contrôle inhibiteur du conflit perceptif ou moteur engendre un allongement des PAP et TAT quel que soit l'âge.

L'interaction *Age * Inhibition* (Figure 29) (ou *Age * Tâche cognitive*, Figure 30, Tableau 15) confirme que, bien que les sujets âgés soient moins performants que les sujets jeunes, la présence d'un conflit inhibiteur affecte dans la même mesure la charge attentionnelle associée à la planification et l'exécution de leurs réponses. Les moindres capacités inhibitrices des sujets âgés pourraient expliquer ce résultat [cf. performances au test de Stroop, TR manuels IP et IM, Tableau 13].

Par ailleurs, l'absence d'interaction *Age * Vibration * Tâche cognitive* suggère que la régulation posturale de la personne âgée ne nécessite pas une inhibition perceptuelle des informations proprioceptives erronées par une perturbation au niveau des chevilles. Ainsi, à l'instar du sujet jeune, la régulation sensorimotrice de l'adulte âgé n'implique pas de contrôle inhibiteur spécifique, y compris en présence d'un contexte proprioceptif altéré. Ce résultat

essentiel est en désaccord avec le rôle suggéré de l'IP dans la gestion des informations proprioceptives erronées chez la personne âgée (Redfern et al., 2009). L'hypothèse est donc invalidée puisque, même si les VTL et le conflit inhibiteur augmentent le coût attentionnel associé à l'initiation du pas, la régulation de cette dernière ne nécessite pas un contrôle inhibiteur supplémentaire pour assumer les sollicitations en cours, quel que soit l'âge.

Le rejet de cette hypothèse est notamment à discuter au regard du statut exécutif¹⁰¹ des sujets âgés inclus dans cette étude. Il est reconnu que l'efficacité des fonctions exécutives influence la production du mouvement (Allali et al., 2010). Par exemple, Rucco et al. (2017) ont comparé le profil de marche [i.e., longueur de pas, durée d'un cycle de pas] de sujets âgés en bonne santé ($n = 20$, 65.5 ± 5.4 ans) à celui de patients présentant une atteinte fronto-temporale¹⁰² ($n = 23$, 66.1 ± 6.2 ans). Leurs résultats ont mis en évidence que ces patients présentaient un profil de marche plus lent et moins stable [i.e., temps d'arrêt et temps passé en double appui plus important] que les sujets en bonne santé. Dans un contexte de double tâche (marche et tâche de compte à rebours), une dégradation d'autant plus importante du profil de marche a été observée chez ces patients par rapport aux sujets âgés sains (Rucco et al., 2017). Par ailleurs, les sujets âgés inclus dans cette présente étude étaient tous *non-chuteurs* et rapportaient une quasi absence d'appréhension par rapport à la chute (Tableau 13). Or, il est reconnu que le statut « chuteur » affecte les performances exécutives et motrices de la personne âgée, d'autant plus lors de leur évaluation simultanée (Schoene et al., 2014). Ainsi, l'élargissement des inclusions aux sujets âgés

¹⁰¹ Pour rappel, leurs performances exécutives des sujets âgés inclus dans cette étude se situaient dans le meilleur quartile de leur tranche d'âge (normes GREFEX, catégorie âge > 60 ans).

¹⁰² Une atteinte fronto-temporale engendre notamment une dégradation précoce des fonctions exécutives en l'absence de troubles mnésiques (Hodges, 2013).

chuteurs ou présentant des fonctions exécutives altérées constitue la prochaine étape de ce projet de recherche biomédicale STEP'INH.

Pour conclure, outre les moindres performances liées à l'avancée en âge et à la présence d'inhibition, aucune implication spécifique de l'IP n'a été observée dans le contrôle sensorimoteur du sujet âgé face à une perturbation proprioceptive. De plus, il a été observé qu'avec l'âge la planification (PAP) de la réponse motrice n'était plus impactée par les VTL lors des tâches cognitives les plus complexes [i.e., tâche de TRC₂, tâches de conflit]. Dès lors, des éléments de discussion en lien avec la sensibilité du sujet âgé à la perturbation induite par les VTL et une potentielle surcharge attentionnelle engendrée par la configuration expérimentale lors de ces tâches spécifique ont été avancés. Néanmoins, étant donné qu'à ce jour peu de travaux issus de la littérature sont à même de soutenir ce résultat, une étude complémentaire a été menée dans le cadre de cette thèse afin de mettre à l'épreuve la robustesse de ce résultat original.

La configuration expérimentale mise en place dans cette dernière étude a tenu compte d'une observation relative à la réponse mécanique à produire et à la variable dépendante considérée.

Il a été rapporté que la complexité mécanique de la tâche à accomplir module l'impact postural engendré par les VTL appliquées au niveau des tendons d'Achille (Floyd et al., 2014). Par exemple, les déséquilibres posturaux qu'elles engendrent sont plus importants lorsque le sujet maintient un équilibre orthostatique par rapport à une tâche dynamique d'initiation de pas ou de marche (Ivanenko et al., 2000). Cette observation serait notamment liée à l'inhibition présynaptique des afférences Ia observée durant la marche (Courtine et al., 2007a), permettant ainsi une moindre influence du contexte proprioceptive et, de ce fait, un contrôle plus

automatique (Courtine et al., 2007b). Ainsi, afin d'optimiser l'impact des VTL sur les régulations posturales, le sujet placé en équilibre orthostatique a cette fois produit des réponses podales « statiques » [i.e., levée de talon].

Egalement adoptée dans les études 2 et 3 de cette thèse, cette modalité de réponse a permis l'étude d'une variable dépendante alternative au PAP. En effet, lors d'une tâche d'initiation de pas réactive, un débat existe au sein de la littérature concernant l'extraction du TR à partir de la composante verticale de la force de réaction au sol (F_z). Certains auteurs soutiennent que la variable reflétant le TR du sujet, tel qu'il est évalué au cours de réponses manuelles ou podales statiques, est le PAP (Patla et al., 1993; Sparto et al., 2014b; Tisserand et al., 2016) tandis que d'autres y préfèrent l'intervalle de temps entre l'apparition du signal de réponse et la levée du pied [en anglais « *foot lift-off* »] (Rogers et al., 2003b; Schoene et al., 2015, 2017). La configuration expérimentale statique mise en place dans cette étude complémentaire a ainsi permis de mesurer des TR et donc de s'affranchir de la potentielle précocité temporelle de la variable PAP.

Etude 5. En quelques mots

- *A l'instar du jeune adulte, la régulation posturale de la personne âgée ne nécessite aucun contrôle inhibiteur spécifique, quel que soit le contexte proprioceptif.*



Rejet de l'hypothèse suggérant un rôle spécifique de l'IP dans le contrôle sensorimoteur chez la personne âgée.

- *L'équilibre orthostatique de la personne âgée est impacté dans une moindre mesure par les vibrations que celui du jeune adulte.*
- *En présence de vibrations, la planification de l'action motrice n'est pas affectée chez la personne âgée.*



Surcharge attentionnelle engendrée par la complexité de la réponse attendue ?



Et maintenant : De tels résultats sont-ils observés sur le TR du sujet âgé lors de réponses podales statiques ?

I.4. Etude 6: Existe-t-il une interaction entre inhibition perceptive, inhibition motrice et fonction sensorimotrice chez le sujet âgé lors d'une tâche posturale statique ?

1. Hypothèse

L'hypothèse avancée désormais est que, **face à une perturbation proprioceptive, le contrôle postural de la personne âgée ne nécessite pas l'implication d'un contrôle inhibiteur spécifique**. Conformément aux résultats de l'étude précédente, **aucun effet de cette perturbation n'est attendu sur les TR**. Ainsi, les tâches cognitives ont été réalisées dans une configuration d'équilibre orthostatique avec ou sans VTL au niveau des tendons d'Achille.

2. Méthode

2.a) Sujets

Seize sujets (7 hommes et 9 femmes, âge moyen $77,1 \pm 2,8$ ans), n'ayant aucune d'expérience préalable dans les tâches réalisées, ont pris part volontairement à cette étude. Aucun d'entre eux n'a rapporté avoir fait une chute dans les 12 mois précédant l'inclusion dans l'étude.

Le protocole étant composé d'une session unique, une rapide évaluation cognitive a été réalisée par l'intermédiaire du questionnaire MMSE¹⁰³ et du test Montréal Cognitive assesment (MoCA, noté sur 30) (Tableau 18, page 211). Ce dernier permet d'évaluer succinctement les fonctions exécutives (TMT partie B), l'attention (ex. empans de chiffres), la mémoire (rappel de 5 mots), le langage (fluence verbale), les capacités visuoconstructives (ex. « *dessinez une horloge indiquant onze heure dix* »), le calcul (soustraire 7 à partir de 100) et l'orientation (ex. « *en quelle année sommes-nous ?* »).

¹⁰³ Un *t* de Student a permis d'établir que le score moyen au MMSE des sujets âgés de l'étude 5 était statistiquement équivalent au score moyen des sujets de cette étude ($t = -0.27, p > 0.8$; score MMSE sujets âgés étude 5 : 29.1 ± 1.3 vs. étude 6 : 29 ± 1.1).

2.b) Tâches cognitives

Les tâches cognitives réalisées, comprenant une tâche de TRS, de TRC₂, de conflit perceptif (essais P_C et IP_NC), de conflit moteur (essais IM_NC) et une tâche neutre (essais M_C), étaient identiques à celles décrites lors de l'étude 5 dans l'axe ML¹⁰⁴.

2.c) Perturbation proprioceptive

La perturbation proprioceptive mobilisée comportait les mêmes caractéristiques que celle des études précédentes (ex. page 165).

2.d) Procédure

Les sujets ont été répartis aléatoirement au sein de deux groupes indépendants. L'ensemble du protocole était réalisé en position bipodale, les sujets du premier groupe étant confrontés à un **contexte proprioceptif neutre** (noté *G_CONT*, $n = 8$, 4 hommes et 4 femmes, âge moyen $76,7 \pm 3,3$ ans) tandis que ceux du second groupe étaient confrontés à un **contexte proprioceptif perturbé** par les VTL (noté *G_VIB*, $n = 8$, 3 hommes et 5 femmes, âge moyen $77,4 \pm 2,5$ ans) (voir Tableau 18 pour la description des groupes, page 211). Le protocole était composé d'une session unique durant laquelle le sujet réalisait les différentes tâches cognitives en mobilisant des réponses podales. Pour rappel, ces dernières consistaient en une levée du talon droit ou du talon gauche, chacun étant placé sur un bouton presseur adapté. Ces tâches duraient entre 1' et 2'30'' et étaient suivies par 90 secondes de repos au minimum, en position assise.

Quel que soit le groupe, l'équilibre orthostatique a été évalué sans et avec VTL au niveau des tendons d'Achille (*CONT vs. VTL*) en début de session. Chaque mesure durait 60 secondes,

¹⁰⁴ Etant donné que ces tâches étaient réalisées dans une configuration d'équilibre orthostatique, les stimuli étaient présentés uniquement à droite ou à gauche de l'écran (cf. tâche TRC₂ et de conflit perceptif dans l'axe ML) ou au centre de l'écran dirigés vers la droite ou la gauche (cf. tâche neutre et de conflit moteur). Ces tâches étaient donc identiques à celles réalisées dans l'étude 2 et 3 (cf. pages 122-151).

suivie par 90 secondes de repos, selon le même dispositif et les mêmes consignes précédemment décrits (cf. page 166).

2.e) Analyse des données

L'analyse des données du COP était identique à celle des études précédentes (page 167).

Concernant les tâches cognitives, la variable dépendante était le TR médian issu des réponses podales.

2.f) Analyses statistiques

Equilibre Orthostatique : Afin d'évaluer l'effet des VTL sur l'équilibre orthostatique, un test *t* de Student apparié (**CONT** vs. **VIB**) a été réalisé sur chacune des variables du COP.

Tâches de TRS et TRC₂ : Afin d'évaluer l'effet des VTL sur le TR des sujets âgés évaluées, un test *t* de Student indépendant¹⁰⁵ (**G_CONT** vs. **G_VIB**) a été réalisé.

Tâches de conflit : A l'instar des deux études précédentes, deux analyses ont été réalisées afin d'évaluer l'impact des VTL sur la capacité inhibitrice globale [i.e., ANOVA « globale » : *Groupe* (2: **G_CONT** vs. **G_VIB**) * *Inhibition* (2: Absence [moyenne des essais M_C et P_C] vs. Présence [moyenne des essais IM_NC et IP_NC])] et les capacités spécifiques nécessaires à la résolution d'un conflit perceptif (IP) ou moteur (IM) [i.e., ANOVA « spécifique » : *Groupe* (2: **G_CONT** vs. **G_VIB**) * *Tâche cognitive* (4: neutre [essais M_C] vs. incertitude spatiale [essais P_C] vs. conflit moteur [essais IM_NC] vs. conflit perceptif [essais IP_NC])].

¹⁰⁵ Afin d'établir si les deux groupes étaient comparables, une analyse statistique identique a été réalisée sur les caractéristiques de base (âge, taille, poids) et les évaluations cognitives réalisées (scores MMSE et MoCA). Les résultats statistiques sont rapportés dans le Tableau 18.

3. Résultats

3.a) Equilibre Orthostatique

Les résultats sont présentés dans le Tableau 17. En résumé, les VTL ont systématiquement dégradé la stabilité posturale.

Tableau 17. Comparaison des variables du centre de pression mesurées sans et avec vibrations. Données exprimées en moyenne (écart-type)

	<i>CONT</i>	<i>VIB</i>	<i>p</i>
Etendue AP (mm)	25.33 (7.4)	34.06 (11.5)	< 0.01
Etendue ML (mm)	12.21 (5.1)	16.76 (6.8)	< 0.05
ET Position AP (mm)	4.56 (1.5)	5.71 (1.6)	< 0.05
ET Position ML (mm)	2.12 (0.8)	2.97 (0.8)	< 0.01
Vitesse moyenne (mm/s)	8.12 (2.5)	15.43 (3.1)	< 0.05
Aire (95% ellipse) (mm ²)	270.67 (188.8)	415.84 (198.6)	< 0.05

Note. *CONT* : évaluation contrôle; *VIB* : évaluation avec VTL au niveau des tendons d'Achille; AP : axe antéropostérieur; ML : axe médio-latéral; ET : écart-type.

3.b) TR

→ Tâche de TRS et TRC₂

Une différence significative entre le *G_CONT* et *G_VIB* a été observée concernant le TRS ($t=2.13$, $p < 0.05$; *G_VIB*: +23%) et le TRC₂ ($t=2.37$, $p < 0.05$; *G_VIB*: +18%) (Tableau 18).

→ Tâches de conflit - ANOVA globale [2 (Groupe) × 2 (Inhibition)]

L'analyse a révélé un effet du facteur principal *Inhibition* ($F_{(1,14)} = 203.3$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.94$), soulignant de meilleures performances de TR en l'absence de conflit inhibiteur (693.3 ± 76.5 vs. 916.3 ± 99.9 ms, +32%). A l'instar de l'interaction *Groupe * Inhibition* ($p > 0.7$), l'effet

Groupe n'était pas significatif ($p > 0.2$), soulignant ainsi l'absence de différence significative entre les TR du **G_CONT** (775.6 ± 152.9 ms) et du **G_VIB** (834.1 ± 151.2 ms).

→ **Tâches de conflit - ANOVA spécifique** [2 (*Groupe*) \times 4 (*Tâche cognitive*)]

Les TR obtenus sont rapportés dans le Tableau 18.

Un effet du facteur *Tâche cognitive* ($F_{(3,42)} = 31.1$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.69$) a été observé. Les comparaisons post-hoc ont souligné une différence de TR entre la tâche neutre et la tâche de conflit moteur ($p < 0.001$, TR essais M_C : 650.5 ± 79.7 vs. TR essais IM_NC : 951.8 ± 177.1 ms, +46%), et entre les TR de la tâche d'incertitude spatiale et de conflit perceptif ($p < 0.001$, TR essais P_C : 736.1 ± 123.3 vs. TR essais IP_NC : 880.8 ± 120.6 ms, +20%). Aucune différence significative entre les tâches nécessitant ($p > 0.3$), ou non ($p > 0.1$), la résolution d'un conflit n'a été observée (Figure 31). Enfin, l'effet *Groupe* ($p > 0.3$) et l'interaction *Groupe * Tâche cognitive* ($p > 0.6$) n'étaient pas significatifs.

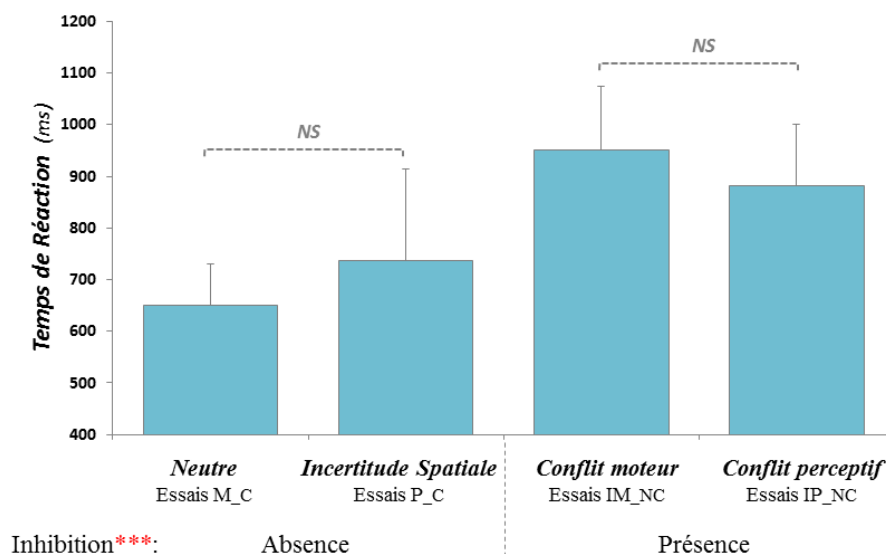


Figure 31. Evolution du temps de réaction en fonction de la tâche de conflit réalisée.

Note. Les barres d'erreur représentent les écart-types. NS : non-significatif; *** : différence significative ($p < 0.001$) entre les tâches présentant un conflit et celles qui n'en présentent pas.

Tableau 18. Présentation des caractéristiques des sujets ainsi que des temps de réaction obtenus lors de chaque tâche expérimentale pour les deux groupes étudiés. Données exprimées en moyenne (écart-type)

		<i>G_CONT</i> <i>n = 8</i>	<i>G_VIB</i> <i>n = 8</i>
Caractéristiques des sujets			
	Homme/Femme	4/4	3/5
	Age (ans) •	76.7 (3.3)	77.4 (2.5)
	Taille (cm) •	161.2 (7.3)	168.6 (10.8)
	Poids (kg) •	63.1 (11.3)	72.6 (5.7)
	Score MMSE (/30) •	28.9 (0.6) [min 28]	29.1 (1.2) [min 27]
	Score MoCA (/30) •	26.9 (1.2)	27.3 (0.9)
	TRS (ms)	415.9 (44.9)	512.3 (119)
	TRC₂ (ms)	507.9 (59.9)	602.1 (94.9)
Inhibition Tâches de conflit – TR réponses podales (ms)			
Absence	Neutre - Essais M_C	628.31 (60.3)	672.69 (94.1)
	Incertitude spatiale - Essais P_C	706.13 (129.1)	766.13 (117.8)
Présence	Conflit moteur - Essais IM_NC	896.69 (193.9)	1006.88 (150.6)
	Conflits perceptif - Essais IP_NC	870.94 (131.1)	890.75 (117.4)

Note. *G_CONT* : réalisation des tâches sans VTL; *G_VIB* : réalisation des tâches avec VTL; MMSE : questionnaire mini-mental state examination; MoCA : test Montréal cognitive assesement; TR : temps de réaction; M_C : essais neutres; IP: inhibition perceptive; NC : non-congruent; IM: inhibition motrice. • Absence de différence entre les groupes concernant ces critères de base ($p < 0.05$).

4. Discussion

Cette étude complémentaire mettait à l'épreuve les résultats obtenus lors de l'étude 5 chez le sujet âgé. Pour rappel, ces résultats avaient mis en évidence chez le sujet âgé qu'une initiation réactive du pas ne nécessitait pas un contrôle inhibiteur spécifique, quel que soit le contexte proprioceptif présent. De plus, la planification de la réponse motrice [i.e., performances de PAP] n'était pas affectée par la présence de VTL. Ainsi, contrairement à la configuration d'initiation de pas développée précédemment, la présente étude mobilisait les mêmes tâches cognitives dans une configuration d'équilibre orthostatique exigeant des réponses podales « statiques », permettant ainsi la mesure classique du TR.

Les résultats obtenus soutiennent ceux de l'étude 5 puisque la présence de VTL n'a pas impacté le TR lors des tâches cognitives développées par Nassauer & Halperin (2003), que ces dernières impliquent, ou non, un conflit inhibiteur perceptif ou moteur.

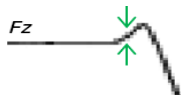


4.a) Effet des vibrations sur le TR

Aucun effet des VTL n'a été observé sur les performances de TR obtenues lors des tâches de conflit. Ce résultat est notamment à mettre en lien avec ceux de l'étude 3 qui évaluait de jeunes adultes (21.5 ± 2.3 ans) exactement dans la même configuration [i.e., debout, réponses podales (cf. Figure 20, page 145 ; Etude 3, pages 138-151)]. Les résultats avaient rapporté que le TR à ces mêmes tâches était impacté par la présence de VTL au niveau des tendons d'Achille (+9%, Figure 20). Ainsi, l'argument selon lequel le sujet âgé serait moins affecté que le jeune adulte par cette perturbation vibratoire spécifique semble s'imposer de nouveau.

Néanmoins, il est important de préciser que ce profil de résultats n'a pas été observé sur les TR des tâches de TRS et de TRC₂, les analyses révélant un impact négatif des VTL sur les performances. Ainsi, contrairement à son évaluation dans un contexte dynamique d'initiation de

pas (cf. récapitulatif Tableau 19), le TRC_2 de l'adulte âgé se trouve ici allongé en présence de VTL. Il est possible d'émettre l'hypothèse que la réponse podale statique attendue n'a pas induit une complexité suffisamment importante pour engendrer une *surcharge attentionnelle* lors de la tâche de TRC_2 en présence de VTL. En effet, la différence entre les sujets du G_CONT et du G_VIB soutient que, dans une telle configuration *statique*, le sujet âgé dispose d'une réserve attentionnelle qui est utilisée en présence de VTL afin de conserver un niveau de performance relativement élevé lors des tâches de TRS et de TRC_2 . Ceci tend à confirmer que la complexité de la tâche cognitive modulerait le contrôle de cette perturbation proprioceptive chez le sujet âgé.

Tableau 19. Evolution de l'impact des vibrations localisées sur les performances de l'adulte âgé en fonction de la variable dépendante et de la tâche cognitive considérée.

			
	PAP	TR	TAT
TRS	$p < 0.01$ 219.4 vs. 259.4 ms +18%	$p < 0.05$ 415.9 vs. 512.3 ms +23%	$p < 0.01$ 686.1 vs. 745 ms +9%
TRC_2	NS 274.2 vs. 267.7 ms	$p < 0.05$ 507.9 vs. 602.1 ms +18%	$p < 0.01$ 791.3 vs. 873.8 ms +10%
Tâches de conflit	NS 391.5 vs. 388.1 ms	NS 775.6 vs. 834.1 ms	$p < 0.001$ 1014.1 vs. 1086.5 ms +7%

Note. Les valeurs indiquées représentent les performances moyennes sans vs. avec vibrations. Tâche de **TRS** : temps de réaction simple, **TRC_2** : temps de réaction de choix à deux éventualités, **PAP** : premier ajustement postural, calculé à partir de la composante verticale de force de réaction au sol (Fz), il correspond à l'intervalle de temps entre l'apparition du signal de réponse et la première variation significative de Fz. **TR** : temps de réaction issu de réponses podales statiques. **TAT** : temps d'action total, intervalle de temps entre le signal de réponse et le contact du pied sur le sol suite à l'initiation du pas. **NS** : effet non-significatif du facteur *Vibration*.

4.b) Effet de l'inhibition sur le TR

Conformément à la littérature et aux autres études menées dans cette thèse, un allongement du TR a été observé en présence d'inhibition. L'augmentation du coût attentionnel engendré par l'implication d'un contrôle inhibiteur était identique lors de la résolution du conflit perceptif (essais IP_NC) et du conflit moteur (essais IM_NC) (Figure 31).

L'absence d'interaction *Groupe * Tâche cognitive* confirme que le contrôle postural de la personne âgée ne nécessite pas l'implication d'un contrôle inhibiteur spécifique face à une perturbation proprioceptive. Il est important de préciser que les sujets inclus dans cette étude étaient significativement plus âgés que ceux ayant participé à l'étude 5¹⁰⁶. Ainsi, cette observation ne semble pas dépendante de l'âge et soutient donc d'autant plus que le vieillissement n'accorde pas un rôle spécifique à l'IP dans la gestion des informations proprioceptive chez la personne âgée.

En conclusion, les résultats de cette étude complémentaire soutiennent ceux rapportés dans l'étude précédente chez le sujet âgé puisque, malgré une modalité de réponse et une variable dépendante alternatives, la présence de VTL au niveau des tendons d'Achille n'affecte pas le TR de la personne âgée et n'engendre pas un contrôle inhibiteur spécifique de son contrôle sensorimoteur.

¹⁰⁶ Analyse *t* de Student ($t = -7.2, p < 0.001$, Sujets âgés Etude 5 : 70.1 ± 3.3 ans vs. Sujets Etude 6 : 77.1 ± 2.8 ans).

Etude 6. En quelques mots

- *La régulation de l'équilibre orthostatique de la personne âgée ne nécessite aucun contrôle inhibiteur spécifique, quel que soit le contexte proprioceptif.*



*Rejet de l'hypothèse suggérant un rôle de l'IP dans le contrôle sensorimoteur
chez la personne âgée*

- *Le temps de réaction de la personne âgée lors des tâches de conflit n'est pas affecté par la présence de vibrations, contrairement à celui des tâches cognitivement moins complexes.*



Surcharge attentionnelle engendrée par la complexité de la réponse attendue

II. Seconde phase expérimentale : discussion générale et conclusion

L'objectif de cette seconde phase expérimentale était d'évaluer les interactions entre IP, IM et fonction sensorimotrice au cours de l'avancée en âge. Plus précisément, il s'agissait de tester si, en présence d'une perturbation proprioceptive, la régulation posturale de la personne âgée nécessitait une inhibition *perceptive* des informations proprioceptives erronées.

1. Apports théoriques et expérimentaux

Une première tâche d'initiation de pas réactive, en réponse à des stimuli manipulant l'IP ou l'IM, a été réalisée avec et sans perturbation proprioceptive par des sujets jeunes [*Etude 4*]. L'hypothèse jusqu'alors inexplorée, suggérant que les régulations posturales du jeune adulte ne nécessitent aucun contrôle inhibiteur spécifique quel que soit le contexte proprioceptif, a été validée. Par la suite, la comparaison de sujets âgés et de sujets jeunes a mis en évidence que le vieillissement ne modifiait pas le profil des performances. En effet, même chez la personne âgée, la gestion d'une perturbation proprioceptive au niveau des tendons d'Achille n'implique pas un contrôle inhibiteur spécifique de la fonction sensorimotrice. Cette observation s'est révélée à la fois face à une modalité de réponses dynamique [*Etude 5*] et statique [*Etude 6*]. Par conséquent, ***l'hypothèse de départ, soutenant une implication spécifique de l'IP dans le processus d'intégration proprioceptive de la personne âgée, est rejetée.*** Plusieurs interprétations peuvent être associées au rejet de cette hypothèse.

→ *Conséquence des variables dépendantes et/ou de la configuration expérimentale adoptée ?*

Pour rappel, l'hypothèse testée a été initialement formulée par Redfern et al. (2009) sur la base d'analyses corrélationnelles. Les apports contradictoires de leurs résultats et de ceux rapportés dans cette thèse pourraient être liés aux différentes variables dépendantes considérées.

En effet, leurs analyses portaient spécifiquement sur des scores d'inhibition [i.e., score = TR essais non-congruents – TR essais congruents; cf. Tableau 2, page 52] et sur une seule variable posturale¹⁰⁷. La corrélation significative obtenue entre les performances d'IP et de stabilité posturale face à une perturbation proprioceptive pourrait ainsi être le reflet de la complexité plus importante de la tâche de conflit perceptif (I = 2 bits) par rapport à celle de conflit moteur (I = 1 bit). En effet, cette complexité engendre des scores d'IP largement inférieurs à ceux d'IM [i.e., score IP_{n°1} moyen = 40 ms vs. score IM moyen = 152 ms; cf. Figure 5, page 80]. L'obtention d'une telle corrélation pourrait donc être la conséquence des variables dépendantes mobilisées et non d'une réelle implication de l'IP dans le contrôle sensorimoteur de la personne âgée.

L'une des perspectives statistiques de ce travail est de tester l'influence de ces scores d'inhibition sur les résultats obtenus au cours de ces phases expérimentales. En effet, à partir des données de TR récoltées dans cette thèse, le calcul de ces scores est possible. Analyser l'influence du contexte proprioceptif (neutre vs. perturbé) sur ces scores d'inhibitions (score IP vs. score IM) permettra d'établir si les résultats de Redfern et al. (2009) sont la conséquence de la variable dépendante étudiée ou l'illustration d'un lien purement statistique entre l'IP et la stabilité posturale en proprioception perturbée.

Par ailleurs, étant donné l'influence de l'effecteur de réponse mobilisé sur le TR [ex. TR réponses manuelles < TR réponses podales (Chan & Chan, 2011; Darbutas et al., 2013)], une perspective expérimentale est également envisageable. L'idée serait de mettre en place une configuration expérimentale plus proche de celles adoptées par Redfern et al. (2009) pour mesurer respectivement l'inhibition et l'équilibre orthostatique. Par exemple, l'évaluation de l'IP et de l'IM par des réponses manuelles chez des sujets âgés se tenant debout, avec et sans

¹⁰⁷ Pour rappel, la stabilité posturale était évaluée via la « *root mean square* » des déplacements du COP sur l'axe AP (cf. Figure 5, page 80).

perturbation proprioceptive au niveau des chevilles, permettrait d'établir l'influence potentielle de la configuration expérimentale adoptée sur leurs résultats.

→ *Conséquence de la perturbation proprioceptive ?*

Lors des tâches de conflit, les performances de PAP et de TR du sujet âgé ne sont pas impactées par les vibrations. Soutenu par les mesures de l'équilibre orthostatique par l'intermédiaire du COP, ce résultat spécifique amène à penser qu'avec l'âge l'organisme est moins sensible aux effets des VTL sur les tendons d'Achille.

Les rares résultats actuellement rapportés dans la littérature quant à l'effet de ces vibrations sur l'équilibre orthostatique en fonction de l'âge divergent des résultats rapportés dans cette thèse (Abrahámová et al., 2009 ; Hay et al., 1996). Cette divergence pourrait notamment être liée à certains paramètres méthodologiques, tels que la durée d'application des VTL [ex. 10 secondes vs. 20 secondes (Abrahámová et al., 2009 ; Hay et al., 1996)], l'absence de comparaison des performances posturales avec VTL à une session contrôle (Abrahámová et al., 2009¹⁰⁸), l'âge des sujets âgés [ex. 63 ans (Abrahámová et al., 2009) vs. Etude 5 : 70.1 ans vs. Etude 6 : 77.1 ans] et les faibles effectifs évalués [ex. 9 sujets âgés (Abrahámová et al., 2009 ; Hay et al., 1996)]. D'un point de vue expérimental, certaines pistes peuvent être envisagées afin de caractériser les impacts spécifiques de cette perturbation proprioceptive au cours de l'âge et ainsi mettre à l'épreuve l'interprétation d'une moindre sensibilité liée au vieillissement.

A ce jour, aucune étude dans la littérature n'a évalué l'impact au cours de l'âge des vibrations des tendons d'Achille sur l'équilibre orthostatique. Procéder à une telle évaluation, chez des sujets âgés par exemple de 18 à 90 ans, permettrait de caractériser plus finement les

¹⁰⁸ Cette étude évaluait l'effet de différentes fréquences de VTL (40 Hz vs. 60 Hz vs. 80 Hz) sur l'équilibre orthostatique de sujets jeunes (26 ans) et âgés (63 ans). Ainsi aucune évaluation contrôle « sans VTL » n'était réalisée.

relations entre vieillissement, posture et vibrations. Il serait ainsi possible d'établir si la sensibilité à ces vibrations diminue progressivement avec l'avancée en âge ou si au contraire cette sensibilité décline brusquement à partir d'un âge précis.

→ *Conséquence des critères d'inclusion ?*

Aucune information quant au statut cognitif et au niveau des fonctions exécutives des sujets âgés évalués par Redfern et al. (2009) n'est disponible. Seul un score supérieur à 23 sur 30 au questionnaire MMSE était nécessaire d'un point de vue cognitif à l'inclusion dans cette étude, sans néanmoins préciser le score moyen obtenu par les sujets évalués. Or, il est reconnu qu'un score de 23 au questionnaire MMSE reflète une déficience cognitive légère¹⁰⁹. Aucune indication relative aux antécédents de chutes n'était par ailleurs communiquée.

Les sujets âgés évalués dans cette thèse étaient en bonne santé, non-chuteurs et présentaient un statut physique particulièrement actif (cf. Tableau 13, pages 186-187). De plus, le score moyen au questionnaire MMSE était de 29 sur 30, avec un score minimal de 26¹¹⁰. L'évaluation des fonctions exécutives a révélé qu'aucun sujet ne présentait de déficience exécutive, et rapportait même que leur niveau de performance se situait dans le meilleur quartile de leur tranche d'âge.

Sur la base de ces observations, il est important de rappeler que ces paramètres cognitifs et moteurs affectent les performances de l'adulte âgé (Allali et al., 2010; Lord & Fitzpatrick, 2001). Il semble ainsi pertinent d'avancer que la contradiction des résultats de Redfern et al. (2009) et de cette thèse pourrait être la conséquence des différents critères mobilisés pour

¹⁰⁹ cf. données normatives établies sur un échantillon de 1656 sujets français âgés de 50 à 89 ans par le Groupe de Réflexion sur les Évaluations COgnitives - GRECO.

¹¹⁰ Ce score de 26/30 au questionnaire MMSE a été obtenu par un seul sujet sur les 42 sujets âgés évalués.

l'inclusion des sujets dans ces études. Les expérimentations menées dans le cadre du projet STEP'INH, abordées ci-après, visent à tester cette interprétation.

Pour conclure, cette seconde phase expérimentale apporte des éléments nouveaux relatifs au triptyque *inhibition- fonction motrice-proprioception* puisque qu'avec l'âge, les performances de TR aux tâches de conflit considérées ne sont pas affectées par les vibrations, ces dernières n'impliquant pas une inhibition spécifique dans le contrôle sensorimoteur de l'adulte âgé.

La thèse ainsi soutenue est que l'inhibition perceptive n'est pas spécifiquement impliquée dans le contrôle sensorimoteur de la personne âgée et ce, même en présence d'un contexte proprioceptif perturbé.

2. Perspectives STEP'INH

Compte tenu de l'influence du niveau exécutif (Rucco et al., 2017) et de la chute (Schoene et al., 2014) sur les performances motrices et inhibitrices de la personne âgée, et le peu d'éléments concernant les sujets évalués par Redfern et al. (2009), il semble intéressant de poursuivre les recherches menées dans cette thèse auprès de sujets âgés répondant à d'autres critères cognitivo-moteurs. Ainsi, l'élargissement des inclusions aux sujets âgés présentant des fonctions exécutives dans la normalité ou altérées et/ou ayant subi une ou plusieurs chutes, constitue la prochaine étape de ce travail de recherche STEP'INH.

Par la suite, l'objectif est de réaliser un suivi longitudinal des performances des sujets évalués, notamment douze mois après leur inclusion. Il serait ainsi possible d'établir si une telle

évaluation combinant inhibition et initiation réactive du pas avec VTL permet de prédire le risque de chute chez la personne âgée.

3. Vieillesse, inhibition perceptive et inhibition motrice : perspectives

Un déclin général lié à l'âge des capacités inhibitrices a été observé dans cette thèse, à l'instar de nombreux résultats rapportés dans la littérature (Bloemendaal et al., 2016; Butler et al., 1999; Nielson et al., 2002b; Vallesi et al., 2010). Plus spécifiquement, les travaux s'intéressant au vieillissement cognitif soutiennent une atteinte sélective des processus d'inhibition au cours du vieillissement, une atteinte focalisée sur les processus inhibiteurs contrôlés (Andrès et al., 2008 ; Collette et al., 2009). L'IP et l'IM sont deux processus catégorisés comme contrôlés, puisqu'ils renvoient à une suppression consciente et volontaire des informations et des réponses non-pertinentes pour la tâche en cours. L'observation de moindres performances d'IP et d'IM chez le sujet âgé [*Etude 5*] confirme donc que le vieillissement affecte les capacités inhibitrices contrôlées. En accord avec Germain & Collette (2008), les performances d'IP étaient équivalentes à celles d'IM, quelle que soit la variable dépendante considérée. Ainsi, le vieillissement affecte dans la même mesure l'IP et l'IM, quelle que soit la configuration expérimentale permettant de les évaluer.

Ce déficit d'inhibition a notamment été mis en lien d'un point de vue fonctionnel avec l'augmentation de l'activité neuronale nécessaire à la personne âgée pour réaliser une tâche cognitive. Cette augmentation, caractérisée par une moindre latéralisation des aires corticales recrutées, est un phénomène largement reconnu chez l'adulte âgé (Cabeza et al., 2002; Grady, 2012; Greenwood, 2007; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005; Spreng et al., 2010). Ce profil d'activation a notamment été conceptualisé par le modèle *Hemispheric Asymmetry Reduction in Older adults* (HAROLD) (Cabeza, 2002).

Associée à ce profil d'activation spécifique, la théorie dite de *dédifférenciation* suggère que cette activation symétrique reflète la difficulté liée à l'âge de sélectionner les circuits neuronaux spécialisés dans le traitement d'une tâche cognitive (Baltes & Lindenberger, 1997; Park et al., 2004). En d'autres termes, cette réduction de l'asymétrie serait la conséquence d'un dysfonctionnement de la capacité à maintenir le traitement au sein de l'hémisphère spécialisé. Ce recrutement « non-sélectif » est notamment lié à la réduction du volume de substance blanche classiquement observée au cours du vieillissement (Andrews-Hanna et al., 2007; O'Sullivan et al., 2001). En effet, il est reconnu que les capacités cognitives subissent les altérations structurelles associées à l'avancée en âge (Wu et al., 2013). Le vieillissement cérébral entraîne notamment une diminution du volume de substance blanche et de substance grise, concomitante à une augmentation des espaces péri-cérébraux (de Groot et al., 2016; Guyot, 2005). Ces modifications sont, entre autres, liées à la perte neuronale, à une diminution de la densité synaptique ainsi qu'à une démyélinisation des fibres nerveuses (Guttmann et al., 1998; Guyot, 2005). Par ailleurs, il est important de souligner que la diminution au cours du vieillissement du volume de substance grise n'est pas un phénomène linéaire, et s'observe spécifiquement et précocement au niveau du cortex préfrontal (Sowell et al., 2003; Taki et al., 2011). Considéré comme le siège des fonctions exécutives (Chikazoe, 2010; Diamond, 2013), cette atrophie spécifique du cortex préfrontal participerait au déficit d'inhibition observé chez la personne âgée (Heflin et al., 2011; MacDonald et al., 2000).

Dans le cadre du paradigme de Nassauer & Halperin, cette hypothèse de dédifférenciation a été soutenue par Germain & Collette (2008). En effet, au-delà des moindres performances inhibitrices avec l'âge, ces auteurs ont souligné que la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur entraînait chez la personne âgée un effet d'interaction. Ce résultat pourrait être le reflet

« d'un phénomène de dédifférenciation qui entrainerait l'implication de ressources communes pour exécuter les tâches cognitives qui sont basées sur des ressources distinctes chez le jeune adulte » (Germain & Collette, 2008 – page 11). Néanmoins, il apparaît important de préciser que l'interaction rapportée par ces mêmes auteurs renvoie à une augmentation sous-additive du TR. Quantitativement, le coût associé à la résolution simultanée des conflits perceptif et moteur (tâche IP&IM) était moins important que la somme des coûts associés à leur résolution individuelle¹¹¹ (Germain & Collette, 2008). Ce résultat pourrait être la conséquence d'un effort plus important consenti par le sujet lors de la tâche d'IP&IM ou d'une stratégie d'anticipation adoptée face à la difficulté de cette tâche [i.e., I = 2 bits, présence de deux conflits]. La proportion d'erreurs commises¹¹² dans les différentes tâches expérimentales tendrait à soutenir cette seconde proposition.

L'interprétation assez axiomatique en faveur de « l'influence d'un stade commun de traitement » est classiquement formulée face à un effet d'interaction sur-additive¹¹³ sur le TR (Blacman, 1975; Frowein, 1981; Miller & Pachella, 1976; Sanders et al., 1982). Certains auteurs ont avancé que l'interprétation associée à une interaction sous-additive n'était pas forcément identique à celle d'une interaction sur-additive, non sans conséquence sur la conceptualisation

¹¹¹ Plus précisément, le TR en configuration neutre était égale à : **521** ms, TR IP : **705** ms, TR IM : **724** ms, TR IP&IM : **834** ms.

Le coût associé au conflit *perceptif* était donc de 184 ms (705 – 521 ms), celui du conflit *moteur* était de 203 ms (724 – 521 ms) tandis que celui du conflit *combiné* était de 313 ms (834 – 521 ms).

Ces résultats illustrent ainsi un **effet d'interaction** entre le conflit perceptif et le conflit moteur puisqu'il s'agit ici d'un allongement sous-additif du TR (184 + 203 = 387 vs. 313 ms).

¹¹² Le pourcentage d'erreurs obtenus par les sujets âgés lors de la tâche neutre était de : **1.5%**, lors de la tâche d'IP : **5.1%**, lors de la tâche d'IM : **5.2%**, lors de la tâche IP&IM : **14.1%** (Germain & Collette, 2008). Néanmoins, il est important de préciser que ces auteurs n'ont pas réalisé une comparaison statistique de ces données.

¹¹³ Lorsque l'effet sur le TR des deux variables manipulées simultanément est significativement plus élevé que la somme des effets individuels de ces variables, l'augmentation du TR est dite *sur-additive*.

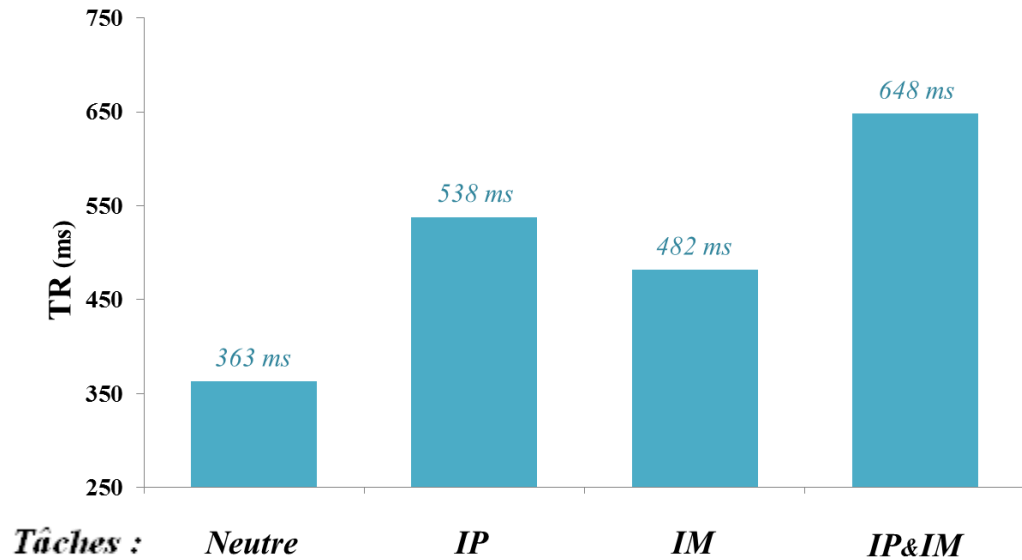
sérielle du système de traitement de l'information (Stanovich & Pachella, 1977). L'existence d'interprétations alternatives liées à un profil sous-additif rend d'autant plus précieuse l'étude approfondie de l'hypothèse de dédifférenciation liée à l'âge des processus inhibiteurs étudiés dans cette thèse.

Mettre à l'épreuve de la neuroimagerie cette interprétation spécifique est nécessaire à une caractérisation plus fine des effets du vieillissement sur les processus d'IP et d'IM, et de manière plus générale, à une meilleure appréhension des mécanismes qui les sous-tendent.

Cette perspective est à mes yeux la prochaine étape indispensable de mon parcours de recherche afin de consolider les réflexions menées dans mon travail de thèse.

Annexes

Annexe 1. Méthode de calcul de la présence et de l'absence du conflit perceptif et du conflit moteur à partir des temps de réaction issus des tâches de conflit proposées par Nassauer & Haleprin (2003) (cf. données chiffrées extraites de Halperin & Nassauer, 2003).



Conflit Perceptif :	<i>Non</i>	Oui	<i>Non</i>	Oui
Conflit Moteur :	<i>Non</i>	<i>Non</i>	Oui	Oui

Conflit Perceptif :

$$TR \text{ Absence} = [(TR \text{ Neutre} + TR \text{ IM}) / 2] \text{ vs. } TR \text{ Présence} [(TR \text{ IP} + TR \text{ IP\&IM}) / 2]$$

$$\text{Ici : } TR \text{ Absence} = [(363 + 482)/2] \text{ vs. } TR \text{ Présence} = [(538 + 648)/2]$$

$$TR \text{ Absence} = 422.5 \text{ ms} \text{ vs. } TR \text{ Présence} = 593 \text{ ms}$$

Conflit Moteur :

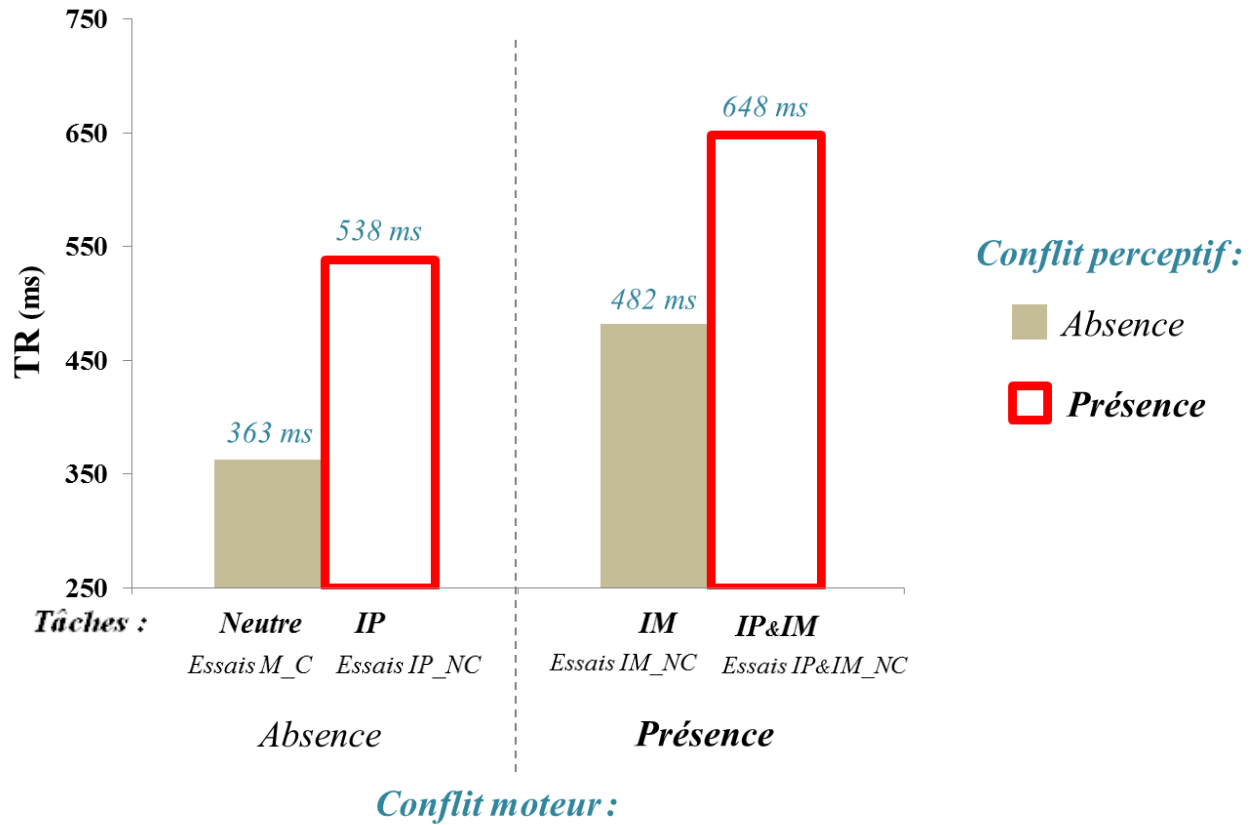
$$TR \text{ Absence} = [(TR \text{ Neutre} + TR \text{ IP}) / 2] \text{ vs. } TR \text{ Présence} [(TR \text{ IM} + TR \text{ IP\&IM}) / 2]$$

$$\text{Ici : } TR \text{ Absence} = [(363 + 538)/2] \text{ vs. } TR \text{ Présence} = [(482 + 648)/2]$$

$$TR \text{ Absence} = 450.5 \text{ ms} \text{ vs. } TR \text{ Présence} = 565 \text{ ms}$$

Note. TR : temps de réaction ; IP : inhibition perceptive ; IM : inhibition motrice ; IP&IM : évaluation simultanée des conflits perceptif et moteur.

Lors de la première phase expérimentale de cette thèse [*Etudes 1, 2 et 3*, pages 100-151], les résultats statistiques relatifs à la manipulation des facteurs « *Conflit Perceptif* » et « *Conflit Moteur* » ont été illustrés de la manière suivante :



Annexe 2. Tests cognitifs réalisés (Etude 5) : Présentation des valeurs percentiles selon l'âge
(d'après le GREFEX).

	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	Moyenne (ET)
Stroop ¹¹⁴ – Nombre d'items en 45 secondes								
< 30 ans	26.8	31.25	37.5	44.1	53.6	62.5	72	43.3 (11.6)
> 60 ans	13.8	14.5	20.3	27.7	34.6	39.4	42.4	24.7 (8.9)
Trail Making Test								
Partie A – Temps (sec)								
< 30 ans	56	44	33	26	22	19	17	29 (12)
> 60 ans	84	77	59	44	37	31	28	49 (18)
Partie B – Temps (sec)								
< 30 ans	94	81	67	57	47	40	37	60 (22)
> 60 ans	226	185	134	105	84	69	61	118 (51)
Fluence verbale - Nombre d'items								
Lettre P								
< 30 ans	13	14	19	25	28.75	32.3	34	24 (6.6)
> 60 ans	12.25	15.5	19	22	26	30	31.25	22.4 (5.5)
Animaux								
< 30 ans	21	24	28	34	40	45	48.2	34.2 (8.2)
> 60 ans	15.25	21	23.75	30	35.5	39.5	43.25	29.7 (8.8)
Brixton – Nombre d'erreurs totales								
< 30 ans	16	15	12.75	9	6	5	4	9.63 (4.2)
> 60 ans	31.25	26	19.25	14	9	8	7	15.31 (6.9)



¹¹⁴ Les normes GREFEX établissent un score à partir du temps (sec) réalisé pour énoncer 50 et 100 items.

Bibliographie

- Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology & motor skills research: somme applications and methodologies constraints. *J. Hum. Mov. Stud.* 14, 101–132.
- Abrahamová, D., & Hlavacka, F. (2008). Age-related changes of human balance during quiet stance. *Physiol. Res.* 57, 957–964.
- Achim, C., Auer, R., Bergeron, C., Cardozo, A., Deprez, M., de Vos, R., Duyckaerts, C., Egensperger, R., Esiri, M., Frosch, M.P., et al. (2002). Global democratic consensus on neuropathological disease criteria. *Lancet Neurol.* 1, 340.
- Adrian, J., Postal, V., Moessinger, M., Rasclé, N., & Charles, A. (2011). Personality traits and executive functions related to on-road driving performance among older drivers. *Accid. Anal. Prev.* 43, 1652–1659.
- Aksan, N., Anderson, S.W., Dawson, J., Uc, E., & Rizzo, M. (2015). Cognitive functioning differentially predicts different dimensions of older drivers' on-road safety. *Accid. Anal. Prev.* 75, 236–244.
- Allali, G., Dubois, B., Assal, F., Lallart, E., de Souza, L.C., Bertoux, M., Annweiler, C., Herrmann, F.R., Levy, R., & Beauchet, O. (2010). Frontotemporal dementia: pathology of gait? *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.* 25, 731–737.
- Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: a systematic review and meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 35, 715–728.
- Anderson, M.C., Bjork, R.A., & Bjork, E.L. (1994). Remembering can cause forgetting: retrieval dynamics in long-term memory. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 20, 1063–1087.
- Andrés, P., Guerrini, C., Phillips, L.H., & Perfect, T.J. (2008). Differential effects of aging on executive and automatic inhibition. *Dev. Neuropsychol.* 33, 101–123.
- Andrews-Hanna, J.R., Snyder, A.Z., Vincent, J.L., Lustig, C., Head, D., Raichle, M.E., & Buckner, R.L. (2007). Disruption of large-scale brain systems in advanced aging. *Neuron* 56, 924–935.
- Anstey, K.J., & Smith, G.A. (1999). Interrelationships among biological markers of aging, health, activity, acculturation, and cognitive performance in late adulthood. *Psychol. Aging* 14, 605–618.
- Anstey, K.J., Lord, S.R., & Williams, P. (1997). Strength in the lower limbs, visual contrast sensitivity, and simple reaction time predict cognition in older women. *Psychol. Aging* 12, 137–144.
- Anstey, K., Wood, J., Kerr, G., Caldwell, H., & Lord, S. (2009). Different cognitive profiles for single compared with recurrent fallers without dementia. *Neuropsychology* 23, 500–8.
- Atkinson, H.H., Rosano, C., Simonsick, E.M., Williamson, J.D., Davis, C., Ambrosius, W.T., Rapp, S.R., Cesari, M., Newman, A.B., Harris, T.B., et al. (2007). Cognitive Function, Gait Speed Decline, and Comorbidities: The Health, Aging and Body Composition Study. *J. Gerontol. Ser. A* 62, 844–850.
- Awh, E., & Gehring, W.J. (1999). The anterior cingulate cortex lends a hand in response selection. *Nat. Neurosci.* 2, 853–854.

Azorin, J., Benhaïm, P., Hasbroucq, T., & Possamai, C. (1995). Stimulus preprocessing and response selection in depression: a reaction time study. *Acta Psychol.* 89, 95–100.

- B -

Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press.

Baecke, J.A., Burema, J., & Frijters, J.E. (1982). A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. *Am. J. Clin. Nutr.* 36, 936–942.

Balota, D.A., Tse, C.-S., Hutchison, K.A., Spieler, D.H., Duchek, J.M., & Morris, J.C. (2010). Predicting conversion to dementia of the Alzheimer's type in a healthy control sample: the power of errors in Stroop color naming. *Psychol. Aging* 25, 208–218.

Baltes, P.B., & Lindenberger, U. (1997). Emergence of a powerful connection between sensory and cognitive functions across the adult life span: a new window to the study of cognitive aging? *Psychol. Aging* 12, 12–21.

Barbat-Artigas, S., Pinheiro Carvalho, L., Rolland, Y., Vellas, B., & Aubertin-Leheudre, M. (2016). Muscle Strength and Body Weight Mediate the Relationship Between Physical Activity and Usual Gait Speed. *J. Am. Med. Dir. Assoc.* 17, 1031–1036.

Barbieri, G., Gissot, A.-S., Fouque, F., Casillas, J.-M., Pozzo, T., & Pérennou, D. (2008). Does proprioception contribute to the sense of verticality? *Exp. Brain Res.* 185, 545–552.

Barrett, R.S., Mills, P.M., & Begg, R.K. (2010). A systematic review of the effect of ageing and falls history on minimum foot clearance characteristics during level walking. *Gait Posture* 32, 429–435.

Basden, B., Basden, D., & Gargano, G. (1993). Directed forgetting in implicit and explicit memory tests: comparison of methods. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 19, 603–16.

Beauchet, O., & Berrut, G. (2006). Marche et double tâche : définition, intérêts et perspectives chez le sujet âgé. *Psychol. Neuropsychiatr. Vieil.* 4, 215–225.

Beauchet, O., Kressig, R., Najafi, B., Aminian, K., Dubost, V., & Mourey, F. (2003). Age-related decline of gait control under a dual-task condition. *J. Am. Geriatr. Soc.* 51, 1187–88.

Beauchet, O., Annweiler, C., Montero-Odasso, M., Fantino, B., Herrmann, F.R., & Allali, G. (2012). Gait control: a specific subdomain of executive function? *J. Neuroengineering Rehabil.* 9, 12.

Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V.L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age Dordr. Neth.* 38, 19.

Bédard, A.-C.V., Trampush, J.W., Newcorn, J.H., & Halperin, J.M. (2010). Perceptual and motor inhibition in adolescents/young adults with childhood-diagnosed ADHD. *Neuropsychology* 24, 424–434.

van den Berg, J., & Neely, G. (2006). Performance on a simple reaction time task while sleep deprived. *Percept. Mot. Skills* 102, 589–599.

- Berger, A., & Posner, M.I. (2000). Pathologies of brain attentional networks. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 24, 3–5.
- Bergström, B. (1973b). Morphology of the vestibular nerve. 3. Analysis of the calibers of the myelinated vestibular nerve fibers in man at various ages. *Acta Otolaryngol.* (Stockh.) 76, 331–338.
- Bergström, B. (1973a). Morphology Of The Vestibular Nerve: II. The Number Of Myelinated Vestibular Nerve In Man At Various Ages. *Acta Otolaryngol.* (Stockh.) 76, 173–79.
- Bernard-Demanze, L., Dumitrescu, M., Jimeno, P., Borel, L., & Lacour, M. (2009). Age-related changes in posture control are differentially affected by postural and cognitive task complexity. *Curr. Aging Sci.* 2, 139–149.
- Berryman, N., Bherer, L., Nadeau, S., Lauzière, S., Lehr, L., Bobeuf, F., Kergoat, M.J., Vu, T.T.M., & Bosquet, L. (2017). Relationships between lower body strength and the energy cost of treadmill walking in a cohort of healthy older adults: a cross-sectional analysis. *Eur. J. Appl. Physiol.* 117, 53–59.
- Bertelson, P. (1963). S-R relationships and reaction times to new versus repeated signals in a serial task. *J. Exp. Psychol.* 65, 478–484.
- Beurskens, R., & Bock, O. (2012). Age-related deficits of dual-task walking: a review. *Neural Plast.* 2012, 131608–131608.
- Bezdicek, O., Lukavsky, J., Stepankova, H., Nikolai, T., Axelrod, B.N., Michalec, J., Růžička, E., & Kopecek, M. (2015). The Prague Stroop Test: Normative standards in older Czech adults and discriminative validity for mild cognitive impairment in Parkinson's disease. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* 37, 794–807.
- Bherer, L., Belleville, S., & Hudon, C. (2004). Le déclin des fonctions exécutives au cours du vieillissement normal, dans la maladie d'Alzheimer et dans la démence frontotemporale. *Psychol. Neuropsychiatr. Vieil.* 2, 181–189.
- Birren, J. (1959). Sensation, perception & modification of behavior in relation to the process of aging. In J. Birren, H. Imus, W. Windle (Eds.), *The Process of Aging in the Nervous System* (pp. 143–165). Springfield: Thomas.
- Bjork, R.A. (1989). Retrieval inhibition as an adaptive mechanism in human memory. In H. L. Roediger & F. I. M. Craik (Eds.), *Varieties of Memory and Consciousness: Essays in Honor of Endel Tulving* (pp. 309–330). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Ble, A., Volpato, S., Zuliani, G., Guralnik, J.M., Bandinelli, S., Lauretani, F., Bartali, B., Maraldi, C., Fellin, R., & Ferrucci, L. (2005). Executive function correlates with walking speed in older persons: the InCHIANTI study. *J. Am. Geriatr. Soc.* 53, 410–15.
- Bloemendaal, M., Zandbelt, B., Wegman, J., van de Rest, O., Cools, R., & Aarts, E. (2016). Contrasting neural effects of aging on proactive and reactive response inhibition. *Neurobiol. Aging* 46, 96–106.
- Bohannon, R.W. (1997). Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20–79 years: reference values and determinants. *Age Ageing* 26, 15–19.

- Boisgontier, M., Beets, I., Duysens, J., Nieuwboer, A., Krampe, R.T., & Swinnen, S. (2013). Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks: Increased recruitment of generic cognitive resources in older adults. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 37, 1824–1837.
- Boisgontier, M., Olivier, I., Chenu, O., & Nougier, V. (2012). Presbypropria: the effects of physiological ageing on proprioceptive control. *Age Dordr. Neth.* 34, 1179–1194.
- Bootsma-van der Wiel, A., Gussekloo, J., de Craen, A.J.M., van Exel, E., Bloem, B.R., & Westendorp, R.G.J. (2003). Walking and talking as predictors of falls in the general population: the Leiden 85-Plus Study. *J. Am. Geriatr. Soc.* 51, 1466–1471.
- Borel, L., Lopez, C., Péruch, P., & Lacour, M. (2008). Vestibular syndrome: A change in internal spatial representation. *Neurophysiol. Clin.* 38, 375-89.
- Botvinick, M., Nystrom, L.E., Fissell, K., Carter, C.S., & Cohen, J.D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature* 402, 179–81.
- Bouazzaoui, B., Isingrini, M., Fay, S., Angel, L., Vanneste, S., Clarys, D., & Tacconat, L. (2010). Aging and self-reported internal and external memory strategy uses: the role of executive functioning. *Acta Psychol. (Amst.)* 135, 59–66.
- Boujon, C., & Lemoine, K. (2002). Le rôle de l'inhibition dans le contrôle attentionnel des traitements. In C. Boujon (Ed.), *L'inhibition Au Carrefour Des Neurosciences et Des Sciences de La Cognition* (pp. 38-43). Marseille: SOLAL Editeur.
- Bowling, A.C., Lindsay, P., Smith, B.G., & Storok, K. (2015). Saccadic eye movements as indicators of cognitive function in older adults. *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 22, 201–219.
- Brauer, S.G., Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). The influence of a concurrent cognitive task on the compensatory stepping response to a perturbation in balance-impaired and healthy elders. *Gait Posture* 15, 83–93.
- Brebner, J.T., & Welford, A.T. (1980). Introduction: an historical background sketch. In A. T. Welford (Ed.) *Reaction Times*, (pp. 1-23). New York: Academic press.
- Bridenbaugh, S.A., & Kressig, R.W. (2015). Motor cognitive dual tasking: early detection of gait impairment, fall risk and cognitive decline. *Z. Gerontol. Geriatr.* 48, 15–21.
- Brown, M., & Besner, D. (2001). On a variant of Stroop's paradigm: which cognitions press your buttons? *Mem. Cognit.* 29, 903–904.
- Brown, L.A., Shumway-Cook, A., & Woollacott, M.H. (1999). Attentional demands and postural recovery: the effects of aging. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 54, M165-171.
- de Bruin, E.D., & Schmidt, A. (2010). Walking behaviour of healthy elderly: attention should be paid. *Behav. Brain Funct. BBF* 6, 59.
- Bukiatme, L., & Chausson, E. (2004). Les modèles attentionnels. *Rééduc. Orthophonique* 25–47.
- Bullock-Saxton, J.E., Wong, W.J., & Hogan, N. (2001). The influence of age on weight-bearing joint reposition sense of the knee. *Exp. Brain Res.* 136, 400–406.

- Burgess, P.W., & Shallice, T. (1996). Response suppression, initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia* 34, 263–272.
- Burke, D. (1980). Muscle spindle activity induced by vibration in man: Implications for the tonic stretch reflex. In D. Burke (Eds) *Spinal and Supraspinal Mechanisms of Voluntary Motor Control and Locomotion* (pp. 243-253). Basel: Krager.
- Burke, D., Hagbarth, K.E., Löfstedt, L., & Wallin, B.G. (1976). The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles. *J. Physiol.* 261, 673–693.
- Butler, K.M., Zacks, T., & Henderson, J.M. (1999). Suppression of reflexive saccades in younger and older adults: age comparisons on an antisaccade task. *Mem. Cognit.* 27, 584–91.
- Butler-Browne, G., & Bigard, A.-X. (2006). Caractéristiques du vieillissement musculaire et effets préventifs de l'exercice régulier. *Sci. Sport* 21, 184–193.

- C -

- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychol. Aging* 17, 85–100.
- Cabeza, R., Anderson, N.D., Locantore, J.K., & McIntosh, A.R. (2002). Aging Gracefully: Compensatory Brain Activity in High-Performing Older Adults. *NeuroImage* 17, 1394–1402.
- Caetano, M.J.D., Lord, S.R., Schoene, D., Pelicioni, P.H.S., Sturnieks, D.L., & Menant, J.C. (2016). Age-related changes in gait adaptability in response to unpredictable obstacles and stepping targets. *Gait Posture* 46, 35–41.
- Caldwell, J.A., Prazinko, B., & Caldwell, J.L. (2003). Body posture affects electroencephalographic activity and psychomotor vigilance task performance in sleep-deprived subjects. *Clin. Neurophysiol. Off. J. Int. Fed. Clin. Neurophysiol.* 114, 23–31.
- Cerella, J. (1985). Age-related decline in extrafoveal letter perception. *J. Gerontol.* 40, 727–736.
- Ceyte, H., Cian, C., Zory, R., Barraud, P.-A., Roux, A., & Guerraz, M. (2007). Effect of Achilles tendon vibration on postural orientation. *Neurosci. Lett.* 416, 71–75.
- Cham, R., Perera, S., Studenski, S., & Bohnen, I. (2007). Striatal dopamine denervation and sensory integration for balance in middle-aged and older adults. *Gait Posture* 26, 516–5.
- Chan, A.H.S., & Chan, K.W.L. (2010). Three-dimensional spatial stimulus-response (S-R) compatibility for visual signals with hand and foot controls. *Appl. Ergon.* 41, 840–848.
- Chan, K.W.L., & Chan, A.H.S. (2011). Spatial stimulus response compatibility for a horizontal visual display with hand and foot controls. *Ergonomics* 54, 233–245.
- Chen, W.-T., Chou, K.-H., Liu, L.-K., Lee, P.-L., Lee, W.-J., Chen, L.-K., Wang, P.-N., & Lin, C.-P. (2015). Reduced cerebellar gray matter is a neural signature of physical frailty. *Hum. Brain Mapp.* 36, 3666–3676.

- Chikazoe, J. (2010). Localizing performance of go/no-go tasks to prefrontal cortical subregions. *Curr. Opin. Psychiatry* 23, 267–272.
- Clark, B. (1970). The vestibular system. *Annu. Rev. Psychol.* 21, 273–306.
- Clark, D.J. (2015). Automaticity of walking: functional significance, mechanisms, measurement and rehabilitation strategies. *Front. Hum. Neurosci.* 9, 246.
- Clark, R.D., Lord, S.R., & Webster, I.W. (1993). Clinical parameters associated with falls in an elderly population. *Gerontology* 39, 117–123.
- Coggan, A.R., Spina, R.J., King, D.S., Rogers, M.A., Brown, M., Nemeth, P.M., & Holloszy, J.O. (1992). Histochemical and enzymatic comparison of the gastrocnemius muscle of young and elderly men and women. *J. Gerontol.* 47, B71-76.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences*. New York: Academic Press.
- Cohen, G., & Martin, M. (1975). Hemisphere differences in an auditory Stroop test. *Percept. Psychophys.* 17, 79–83.
- Cohen, J., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: An interactive graphic system for designing and controlling experiments in the psychology laboratory using Macintosh computers. *Behav. Res. Methods Instrum. Comput.* 25, 257–271.
- Cohen, R.G., Nutt, J.G., & Horak, F.B. (2011). Errors in Postural Preparation Lead to Increased Choice Reaction Times for Step Initiation in Older Adults. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 66A, 705–713.
- Collette, F., & Salmon, E. (2014). [The effect of normal and pathological aging on cognition]. *Rev. Médicale Liège* 69, 265–269.
- Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Salmon, E. (2005). Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning. *Hum. Brain Mapp.* 25, 409–423.
- Collette, F., Schmidt, C., Scherrer, C., Adam, S., & Salmon, E. (2009a). Specificity of inhibitory deficits in normal aging and Alzheimer’s disease. *Neurobiol. Aging* 30, 875–889.
- Collette, F., Germain, S., Hogge, M., & Linden, M.V. der (2009b). Inhibitory control of memory in normal ageing: Dissociation between impaired intentional and preserved unintentional processes. *Memory* 17, 104–122.
- Connelly, S.L., & Hasher, L. (1993). Aging and the inhibition of spatial location. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 19, 1238–1250.
- Cooper, R., Bann, D., Wloch, E.G., Adams, J.E., & Kuh, D. (2015). “Skeletal muscle function deficit” in a nationally representative British birth cohort in early old age. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 70, 604–607.
- Coppin, A.K., Shumway-Cook, A., Saczynski, J.S., Patel, K.V., Ble, A., Ferrucci, L., & Guralnik, J.M. (2006). Association of executive function and performance of dual-task physical tests among older adults: analyses from the InChianti study. *Age Ageing* 35, 619–624.

- Cote, K.A., Milner, C.E., Smith, B.A., Aubin, A.J., Greason, T.A., Cuthbert, B.P., Wiebe, S., & Duffus, S.E.G. (2009). CNS arousal and neurobehavioral performance in a short-term sleep restriction paradigm. *J. Sleep Res.* 18, 291–303.
- Courtine, G., Pozzo, T., Lucas, B., & Schieppati, M. (2001). Continuous, bilateral Achilles' tendon vibration is not detrimental to human walk. *Brain Res. Bull.* 55, 107–115.
- Courtine, G., Harkema, S.J., Dy, C.J., Gerasimenko, Y.P., & Dyhre-Poulsen, P. (2007a). Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans. *J. Physiol.* 582, 1125–1139.
- Courtine, G., De Nunzio, A.M., Schmid, M., Beretta, M.V., & Schieppati, M. (2007b). Stance- and locomotion-dependent processing of vibration-induced proprioceptive inflow from multiple muscles in humans. *J. Neurophysiol.* 97, 772–779.
- Coxon, J.P., Van Impe, A., Wenderoth, N., & Swinnen, S.P. (2012). Aging and inhibitory control of action: cortico-subthalamic connection strength predicts stopping performance. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 32, 8401–8412.
- Craft, J.L., & Simon, J.R. (1970). Processing symbolic information from a visual display: interference from an irrelevant directional cue. *J. Exp. Psychol.* 83, 415–420.
- Cristarella, M.C. (1977). Visual functions of the elderly. *Am. J. Occup. Ther. Off. Publ. Am. Occup. Ther. Assoc.* 31, 432–440.
- D -
- Daigneault, G., Joly, P., & Frigon, J.-Y. (2002). Executive functions in the evaluation of accident risk of older drivers. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* 24, 221–238.
- Dalrymple-Alford, E.C., & Budayer, B. (1966). Examination of some aspects of the Stroop Color-Word Test. *Percept. Mot. Skills* 23, 1211–1214.
- Dalton, C., Sciadras, R., & Nantel, J. (2016). Executive function is necessary for the regulation of stepping activity when stepping in place in older adults. *Aging Clin. Exp. Res.* 28, 909–15.
- Darbutas, T., Juodžbalienė, V., Skurvydas, A., & Kriščiūnas, A. (2013). Dependence of reaction time and movement speed on task complexity and age. *Med. Kaunas Lith.* 49, 18–22.
- Davidson, D.J., Zacks, R.T., & Williams, C.C. (2003). Stroop Interference, Practice, and Aging. *Aging Neuropsychol. Cogn.* 10, 85–98.
- Deary, I.J., Spinath, F.M., & Bates, T.C. (2006). Genetics of intelligence. *Eur. J. Hum. Genet. EJHG* 14, 690–700.
- Decker, L.M., Cignetti, F., & Stergiou, N. (2013). Executive function orchestrates regulation of task-relevant gait fluctuations. *Gait Posture* 38, 537–540.
- Delignière, D., & Deschamps, T. (2000). L'effort mental. In D. Delignière (Ed.) *L'effort*, (pp. 25-40). Paris: Editions revue EPS.

- Demanet, L., Schelstraete, M.-A., Hupet, M., Charlot, V., Doose, G., & Feyreisen, P.F. (2015). *Chapitre III. L'explication du vieillissement cognitif: concepts majeurs et paradigmes de recherche*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Dempster, F. (1991). Inhibitory processes: A neglected dimension of intelligence. *Intelligence* 157–173.
- Dempster, F. (1992). The rise and fall of the inhibitory mechanism: toward a unify theory of cognitive development and aging. *Dev. Rev.* 45–75.
- Dempster, F. (1995). Interference and inhibition in cognition. An historical perspective. In F.N. Dempster & C.J. Brainerd (Eds.), *Interference and Inhibition in Cognition* (pp. 4-28). New York: Academic press.
- Dempster, F., & Corkill, A. (1999). Individual differences in susceptibility to interference and general cognitive ability. *Acta Psychol.* 101, 395–416.
- Der, G., & Deary, I.J. (2006). Age and sex differences in reaction time in adulthood: results from the United Kingdom Health and Lifestyle Survey. *Psychol. Aging* 21, 62–73.
- Dettmer, M., Pourmoghaddam, A., O'Connor, D.P., & Layne, C.S. (2013). Interaction of support surface stability and Achilles tendon vibration during a postural adaptation task. *Hum. Mov. Sci.* 32, 214–227.
- Di Fabio, R.P., Zampieri, C., Henke, J., Olson, K., Rickheim, D., & Russell, M. (2005). Influence of elderly executive cognitive function on attention in the lower visual field during step initiation. *Gerontology* 51, 94–107.
- Diamond, A. (2011). Biological and social influences on cognitive control processes dependent on prefrontal cortex. *Prog. Brain Res.* 189, 319–339.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annu. Rev. Psychol.* 64, 135–168.
- Dietrich, G., Breniere, Y., & Do, M. (1994). Organization of local anticipatory movements in single step initiation. *Hum. Mov. Sci.* 13, 195–210.
- Doherty, T.J., Vandervoort, A., Taylor, W., & Brown, W.F. (1993). Effects of motor unit losses on strength in older men and women. *J. Appl. Physiol. Bethesda Md* 1985 74, 868–74.
- Donders, F.C. (1869). On the speed of mental processes. *Acta Psychol.* 30, 412–431.
- Dorfman, L.J., & Bosley, T.M. (1979). Age-related changes in peripheral and central nerve conduction in man. *Neurology* 29, 38–44.
- Doyle, R.J., Hsiao-Weckslar, E.T., Ragan, B.G., & Rosengren, K.S. (2007). Generalizability of center of pressure measures of quiet standing. *Gait Posture* 25, 166–171.
- Driver, J., & Tipper, S.P. (1989). On the nonselectivity of “selective” seeing: Contrasts between interference and priming in selective attention. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 15, 304–314.

- Du Pasquier, R.A., Blanc, Y., Sinnreich, M., Landis, T., Burkhard, P., & Vingerhoets, F.J.G. (2003). The effect of aging on postural stability: a cross sectional and longitudinal study. *Neurophysiol. Clin. Clin. Neurophysiol.* 33, 213–218.
- Dubois, B., Slachevsky, A., Litvan, I., & Pillon, B. (2000). The FAB: a Frontal Assessment Battery at bedside. *Neurology* 55, 1621–1626.
- Duclos, C., Roll, R., Kavounoudias, A., Roll, J.-P., & Forget, R. (2007). Vibration-induced post-effects: a means to improve postural asymmetry in lower leg amputees? *Gait Posture* 26, 595–602.
- Dujardin, K., & Lemaire, P. (2008). *Neuropsychologie du vieillissement normal et pathologique*. Paris: Masson.
- Duncan, J. (1977). Response selection rules in spatial choice reaction tasks. In S. Dornic (Ed.), *Attention and Performance VI* (pp. 49-61). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- E -

- Earles, J.L., & Kersten, A.W. (2002). Directed forgetting of actions by younger and older adults. *Psychon. Bull. Rev.* 9, 383–388.
- Eikema, D.J.A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2012). Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age* 34, 1381.
- Eikema, D.J.A., Hatzitaki, V., Konstantakos, V., & Papaxanthis, C. (2013). Elderly adults delay proprioceptive reweighting during the anticipation of collision avoidance when standing. *Neuroscience* 234, 22–30.
- Eikema, D.J.A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2014). Application of intermittent galvanic vestibular stimulation reveals age-related constraints in the multisensory reweighting of posture. *Neurosci. Lett.* 561, 112–117.
- Eklund, G. (1972). General features of vibration-induced effects on balance. *Ups. J. Med. Sci.* 77, 112–124.
- Eklund, G., & Hagbarth, K.E. (1966). Normal variability of tonic vibration reflexes in man. *Exp. Neurol.* 16, 80–92.
- Elliott, R. (1968). Simple visual and simple auditory reaction time: A comparison. *Psychon. Sci.* 10, 335–336.
- Enrietto, J.A., Jacobson, K.M., & Baloh, R.W. (1999). Aging effects on auditory and vestibular responses: a longitudinal study. *Am. J. Otolaryngol.* 20, 371–378.
- Eriksen, B., & Eriksen, C. (1974). Effects of noise letters upon identification of a target letter in a non-search task. *Percept Psychophys* 16, 143–149.
- Ernst, M., & Bulthoff, H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends Cogn. Sci.* 8.

- F -

- Falck, R.S., Wilcox, S., Best, J.R., Chandler, J.L., & Liu-Ambrose, T. (2017). The Association Between Physical Performance and Executive Function in a Sample of Rural Older Adults from South Carolina, USA. *Exp. Aging Res.* 43, 192–205.
- Felson, D.T. (1988). Epidemiology of hip and knee osteoarthritis. *Epidemiol. Rev.* 10, 1–28.
- Ferrandez, A.M., Pailhous, J., & Durup, M. (1990). Slowness in elderly gait. *Exp. Aging Res.* 16, 79–89.
- Feyereisen, P., & Hupet, M. (2015). *Parler et communiquer chez la personne âgée*. Presses Universitaires de France.
- Fife, T.D., & Baloh, R.W. (1993). Disequilibrium of unknown cause in older people. *Ann. Neurol.* 34, 694–702.
- Fisk, J.E., & Sharp, C.A. (2004). Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition, shifting, and access. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* 26, 874–890.
- Fitzpatrick, R., & McCloskey, D.I. (1994). Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *J. Physiol.* 478, 173–186.
- Floyd, L.M., Holmes, T., & Dean, J. (2014). Reduced effects of tendon vibration with increased task demand during active, cyclical ankle movements. *Exp. Brain Res.* 232, 283–92.
- Foldvari, M., Clark, M., Laviolette, L.C., Bernstein, M.A., Kaliton, D., Castaneda, C., Pu, C.T., Hausdorff, J.M., Fielding, R.A., & Singh, M.A. (2000). Association of muscle power with functional status in community-dwelling elderly women. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 55, M192-199.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., & McHugh, P.R. (1975). “Mini-mental state”. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *J. Psychiatr. Res.* 12, 189–98.
- Forte, R., Pesce, C., Leite, J.C., De Vito, G., Gibney, E.R., Tomporowski, P.D., & Boreham, C.A.G. (2013). Executive function moderates the role of muscular fitness in determining functional mobility in older adults. *Aging Clin. Exp. Res.* 25, 291–298.
- Fozard, J.L., Vercryssen, M., Reynolds, S.L., Hancock, P.A., & Quilter, R.E. (1994). Age differences and changes in reaction time: the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *J. Gerontol.* 49, P179-189.
- Fredrickson, J.M., Kornhuber, H.H., & Schwarz, D.W.F. (1974). Cortical Projections of the Vestibular Nerve. In H.H. Kornhuber (Ed.) *Vestibular System Part 1: Basic Mechanisms* (pp. 565-582). Springer Berlin: Heidelberg.
- Frowein, H.W. (1981). Selective effects of barbiturate and amphetamine on information processing and response execution. *Acta Psychol.* 47, 105-115.
- Fuhrman, S.I., Redfern, M.S., Jennings, J.R., & Furman, J.M. (2015). Interference between postural control and spatial vs. non-spatial auditory reaction time tasks in older adults. *J. Vestib. Res. Equilib. Orientat.* 25, 47–55.

Fujiyama, H., Tandonnet, C., & Summers, J.J. (2011). Age-related differences in corticospinal excitability during a Go/NoGo task. *Psychophysiology* 48, 1448–1455.

Furman, J.M., & Redfern, M.S. (2001). Effect of aging on the otolith-ocular reflex. *J. Vestib. Res. Equilib. Orientat.* 11, 91–103.

- G -

Gandevia, S.C., & McCloskey, D.I. (1976). Joint sense, muscle sense, and their combination as position sense, measured at the distal interphalangeal joint of the middle finger. *J. Physiol.* 260, 387–407.

Genova, B., Mateeff, S., Bonnet, C., & Hohnsbein, J. (2000). Mechanisms of simple and choice reaction to changes in direction of visual motion. *Vision Res.* 40, 3049–3058.

Germain, S., & Collette, F. (2008). Dissociation of perceptual and motor inhibitory processes in young and elderly participants using the Simon task. *J. Int. Neuropsychol. Soc. JINS* 14, 1014–1021.

Ghisletta, P., Kennedy, K.M., Rodrigue, K.M., Lindenberger, U., & Raz, N. (2010). Adult age differences and the role of cognitive resources in perceptual-motor skill acquisition: application of a multilevel negative exponential model. *J. Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc. Sci.* 65B, 163–173.

Gilhodes, J.C., Roll, J.P., & Tardy-Gervet, M.F. (1986). Perceptual and motor effects of agonist-antagonist muscle vibration in man. *Exp. Brain Res.* 61, 395–402.

Gilsing, M.G., Van den Bosch, C.G., Lee, S.G., Ashton-Miller, J.A., Alexander, N.B., Schultz, A.B., & Ericson, W.A. (1995). Association of age with the threshold for detecting ankle inversion and eversion in upright stance. *Age Ageing* 24, 58–66.

Girard, S., Collignon, O., & Lepore, F. (2011). Multisensory gain within and across hemispaces in simple and choice reaction time paradigms. *Exp. Brain Res.* 214, 1–8.

Gittings, N., & Fozard, J. (1986). Age related changes in visual acuity. *Exp. Gerontol.* 21, 423–33.

Glaser, M.O., & Glaser, W.R. (1982). Time course analysis of the Stroop phenomenon. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 8, 875–894.

Goble, D., Coxon, J., Wenderoth, N., Vam Impe, A., & Swinnen, S. (2009). Proprioceptive sensibility in the elderly: Degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 33, 271–278.

Godefroy, O., & GREFEX (2008). *Fonctions exécutives et pathologies neurologiques et psychiatriques : Evaluation en pratique clinique*. Marseille: De Boeck Université.

Godefroy, O., Azouvi, P., Robert, P., Roussel, M., LeGall, D., Meulemans, T., & Groupe de Réflexion sur l'Évaluation des Fonctions Exécutives Study Group (2010). Dysexecutive syndrome: diagnostic criteria and validation study. *Ann. Neurol.* 68, 855–864.

Godefroy, O., Gibbons, L., Diouf, M., Nyenhuis, D., Roussel, M., Black, S., Bugnicourt, J.M., & GREFEX study group (2014). Validation of an integrated method for determining cognitive ability: Implications for routine assessments and clinical trials. *Cortex J. Devoted Study Nerv. Syst. Behav.* 54, 51–62.

- Gomes, G. de C., Teixeira-Salmela, L.F., Fonseca, B.E., Freitas, F.A.S. de, Fonseca, M.L.M., Pacheco, B.D., Gonçalves, M.R., & Caramelli, P. (2015). Age and education influence the performance of elderly women on the dual-task Timed Up and Go test. *Arq. Neuropsiquiatr.* 73, 187–193.
- Gonzales, J.U., James, C.R., Yang, H.S., Jensen, D., Atkins, L., Thompson, B.J., Al-Khalil, K., & O’Boyle, M. (2016). Different cognitive functions discriminate gait performance in younger and older women: A pilot study. *Gait Posture* 50, 89–95.
- Goodwin, G.M., McCloskey, D.I., & Matthews, P.B. (1972). The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain J. Neurol.* 95, 705–748.
- Grady, C. (2012). The cognitive neuroscience of ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 13, 491–505.
- Grady, C.L., Springer, M., Hongwanishkul, D., McIntosh, R., & Winocur, G. (2006). Age-related changes in brain activity across the adult lifespan. *J. Cogn. Neurosci.* 18, 227–241.
- Greenwood, P.M. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. *Neuropsychology* 21, 657–673.
- de Groot, M., Cremers, L.G.M., Ikram, M.A., Hofman, A., Krestin, G.P., van der Lugt, A., Niessen, W.J., & Vernooij, M.W. (2016). White Matter Degeneration with Aging: Longitudinal Diffusion MR Imaging Analysis. *Radiology* 279, 532–541.
- Grosselin, A., Royer, A., Schneider, F.C.G., Brouillet, D., Martin, S., Pellet, J., Lang, F., & Massoubre, C. (2010). Inhibition des réponses automatiques au test du Hayling dans la schizophrénie. *Encéphale* 36, 277-284.
- Grrishma, B., Gaur, G., Velkumary, S., Gurunandan, U., Aswini, D., & Dinesh, T. (2013). Comparaison of hand and foot reaction times among females: A methodological study using recongition auditory reaction time. *Int. J. Curr. Res.* 5, 4272–4274.
- Guttman, C.R., Jolesz, F.A., Kikinis, R., Killiany, R.J., Moss, M.B., Sandor, T., & Albert, M.S. (1998). White matter changes with normal aging. *Neurology* 50, 972–978.
- Guyot, M. (2005). Imagerie cérébrale du vieillissement normal et pathologique. *Médecine Nucl.* 571–582.

- H -

- Hahn, M., Wild-Wall, N., & Falkenstein, M. (2011). Age-related differences in performance and stimulus processing in dual task situation. *Brain Res.* 1414, 66–76.
- Hallett, P. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Res.* 18, 1279–1296.
- Halperin, J., & Nassauer, K.W. (2003). A response to Raymond Bruyer’s “Are perceptual and motor inhibition processes really dissociated? A comment on Nassauer and Halperin (2003)”. *J. Int. Neuropsychol. Soc. JINS* 9, 813.
- Harnishfeger, K. (1995). The development of cognitive inhibition. Theories, definitions, and research evidence. In F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and Inhibition in Cognition*, (pp. 176-206). San Diego: Academic press.

- Hasher, L., & Zacks, R. (1988). Working memory, comprehension and aging: A review and a new view. In *The Psychology of Learning and Motivation*, (New York: G.H. Bower), pp. 196–225.
- Hasher, L., Zacks, R., & May, C.P. (1999). Inhibitory control, circadian arousal, and age. In D. Gopher & A. Koriat (Eds), *Attention and Performance XVII, Cognitive Regulation of Performance: Interaction of Theory and Application* (pp. 653-675). Cambridge: MIT press.
- Hausdorff, J.M., Yogev, G., Springer, S., Simon, E.S., & Giladi, N. (2005). Walking is more like catching than tapping: gait in the elderly as a complex cognitive task. *Exp. Brain Res.* *164*, 541–548.
- Hausdorff, J.M., Schweiger, A., Herman, T., Yogev-Seligmann, G., & Giladi, N. (2008). Dual Task Decrements in Gait among Healthy Older Adults: Contributing Factors. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* *63*, 1335–1343.
- Hay, L., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1996). Availability of visual and proprioceptive afferent messages and postural control in elderly adults. *Exp. Brain Res.* *108*, 129–139.
- Heflin, L.H., Laluz, V., Jang, J., Ketelle, R., Miller, B.L., & Kramer, J.H. (2011). Let's Inhibit Our Excitement: The Relationships Between Stroop, Behavioral Disinhibition, and the Frontal Lobes. *Neuropsychology* *25*, 655–665.
- Hegeman, J., Weerdesteyn, V., van den Bemt, B., Nienhuis, B., van Limbeek, J., & J, J. (2012). Dual-tasking interferes with obstacle avoidance reactions in healthy seniors. *Gait Posture* *36*, 236–240.
- Herman, T., Mirelman, A., Giladi, N., Schweiger, A., & Hausdorff, J.M. (2010). Executive Control Deficits as a Prodrome to Falls in Healthy Older Adults: A Prospective Study Linking Thinking, Walking, and Falling. *J. Gerontol. Ser. A* *65A*, 1086–1092.
- Herter, T.M., Scott, S.H., & Dukelow, S.P. (2014). Systematic changes in position sense accompany normal aging across adulthood. *J. Neuroengineering Rehabil.* *11*, 43.
- Hick, W.E. (1952). On the rate of gain of information. *Q. J. Exp. Psychol.* *4*, 11–26.
- Hodges, J.R. (2013). Alzheimer's disease and the frontotemporal dementias: contributions to clinico-pathological studies, diagnosis, and cognitive neuroscience. *J. Alzheimers Dis. JAD* *33 Suppl 1*, S211-217.
- Hodzik, S., & Lemaire, P. (2011). Inhibition and shifting capacities mediate adults' age-related differences in strategy selection and repertoire. *Acta Psychol. (Amst.)* *137*, 335–344.
- Holroyd, C.B., Dien, J., & Coles, M.G. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neurosci. Lett.* *242*, 65–68.
- Holtzer, R., Verghese, J., Xue, X., & Lipton, R.B. (2006). Cognitive processes related to gait velocity: results from the Einstein Aging Study. *Neuropsychology* *20*, 215–223.
- Holtzer, R., Verghese, J., Allali, G., Izzetoglu, M., Wang, C., & Mahoney, J.R. (2016). Neurological Gait Abnormalities Moderate the Functional Brain Signature of the Posture First Hypothesis. *Brain Topogr.* *29*, 334–343.

- Horn, N.R., Dolan, M., Elliott, R., Deakin, J.F.W., & Woodruff, P.W.R. (2003). Response inhibition and impulsivity: an fMRI study. *Neuropsychologia* 41, 1959–1966.
- Houx, P.J., Jolles, J., & Vreeling, F.W. (1993). Stroop interference: aging effects assessed with the Stroop Color-Word Test. *Exp. Aging Res.* 19, 209–224.
- Hsieh, S., & Fang, W. (2012). Elderly adults through compensatory responses can be just as capable as young adults in inhibiting the flanker influence. *Biol. Psychol.* 90, 113–126.
- Hsieh, S., & Lin, Y.-C. (2014). The boundary condition for observing compensatory responses by the elderly in a flanker-task paradigm. *Biol. Psychol.* 103, 69–82.
- Hsieh, S., & Lin, Y.-C. (2016). Stopping ability in younger and older adults: Behavioral and event-related potential. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 17, 384–363.
- Hsieh, S., Liang, Y.-C., & Tsai, Y.-C. (2012). Do age-related changes contribute to the flanker effect? *Clin. Neurophysiol. Off. J. Int. Fed. Clin. Neurophysiol.* 123, 960–972.
- Hsieh, S., Wu, M., & Tang, C.-H. (2016). Adaptive Strategies for the Elderly in Inhibiting Irrelevant and Conflict No-Go Trials while Performing the Go/No-Go Task. *Front. Aging Neurosci.* 7, 243.
- Huizinga, M., Dolan, C., & van der Molen, M. (2006). Age-related change in executive function: developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia* 44, 2017–36.
- Huppert, T., Schmidt, B., Beluk, N., Furman, J., & Sparto, P. (2013). Measurement of brain activation during an upright stepping reaction task using functional near-infrared spectroscopy. *Hum. Brain Mapp.* 34, 2817–2828.
- Hutchison, K.A., Balota, D.A., Duchek, J.M., & Duchek, J.M. (2010). The utility of Stroop task switching as a marker for early-stage Alzheimer’s disease. *Psychol. Aging* 25, 545–559.
- Hyman, R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. *J. Exp. Psychol.* 45, 188–196.
- Hytönen, M., Pyykkö, I., Aalto, H., & Starck, J. (1993). Postural control and age. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 113, 119–122.

- I - J -

- van Iersel, M.B., Kessels, R.P.C., Bloem, B.R., Verbeek, A.L.M., & Olde Rikkert, M.G.M. (2008). Executive functions are associated with gait and balance in community-living elderly people. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 63, 1344–1349.
- Ishihara, T., Sugasawa, S., Matsuda, Y., & Mizuno, M. (2017). Relationship between sports experience and executive function in 6-12-year-old children: independence from physical fitness and moderation by gender. *Dev. Sci.* 1-13.
- Ivanenko, Y.P., Grasso, R., & Lacquaniti, F. (2000). Influence of leg muscle vibration on human walking. *J. Neurophysiol.* 84, 1737–1747.
- Jackson, W.M., Davis, N., Sands, S.A., Whittington, R.A., & Sun, L.S. (2016). Physical Activity and Cognitive Development: A Meta-Analysis. *J. Neurosurg. Anesthesiol.* 28, 373–380.

- Jahanshahi, M., Brown, R.G., & Marsden, C.D. (1993). A comparative study of simple and choice reaction time in Parkinson's, Huntington's and cerebellar disease. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 56, 1169–1177.
- Jain, A., Bansal, R., Kumar, A., & Singh, K. (2015). A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students. *Int. J. Appl. Basic Med. Res.* 5, 124–127.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology* Chapter XI. (New York: Cosimo Inc).
- Jankovic, J., Nutt, J.G., & Sudarsky, L. (2001). Classification, diagnosis, and etiology of gait disorders. *Adv. Neurol.* 87, 119–133.
- Jankowska, E. (1992). Interneuronal relay in spinal pathways from proprioceptors. *Prog. Neurobiol.* 38, 335–378.
- Jefferson, A.L., Paul, R.H., Ozonoff, A., & Cohen, R.A. (2006). Evaluating elements of executive functioning as predictors of instrumental activities of daily living (IADLs). *Arch. Clin. Neuropsychol. Off. J. Natl. Acad. Neuropsychol.* 21, 311–320.
- Jennings, J.R., Mendelson, D.N., Redfern, M.S., & Nebes, R.D. (2011). Detecting age differences in resistance to perceptual and motor interference. *Exp. Aging Res.* 37, 179–197.
- Jewsbury, P.A., Bowden, S.C., & Strauss, M.E. (2016). Integrating the switching, inhibition, and updating model of executive function with the Cattell-Horn-Carroll model. *J. Exp. Psychol. Gen.* 145, 220–245.
- Johnson, E.O., Babis, G.C., Soultanis, K.C., & Soucacos, P.N. (2008). Functional neuroanatomy of proprioception. *J. Surg. Orthop. Adv.* 17, 159–164.

- K -

- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kane, M.J., Hasher, L., Stoltzfus, E.R., Zacks, R.T., & Connelly, S.L. (1994). Inhibitory attentional mechanisms and aging. *Psychol. Aging* 9, 103–112.
- Kang, H.G., & Dingwell, J.B. (2008). Separating the effects of age and walking speed on gait variability. *Gait Posture* 27, 572–577.
- Kararizou, E., Manta, P., Kalfakis, N., & Vassilopoulos, D. (2005). Morphometric study of the human muscle spindle. *Anal. Quant. Cytol. Histol.* 27, 1–4.
- Kastner, S., & Ungerleider, L.G. (2000). Mechanisms of visual attention in the human cortex. *Annu. Rev. Neurosci.* 23, 315–341.
- Kattenstroth, J.-C., Kolankowska, I., Kalisch, T., & Dinse, H.R. (2010). Superior sensory, motor, and cognitive performance in elderly individuals with multi-year dancing activities. *Front. Aging Neurosci.* 2, 31.
- Kavounoudias, A., Roll, R., & Roll, J.P. (1999). Specific whole-body shifts induced by frequency-modulated vibrations of human plantar soles. *Neurosci. Lett.* 266, 181–184.

- Kawai, N., Kubo-Kawai, N., Kubo, K., Terazawa, T., & Masataka, N. (2012). Distinct aging effects for two types of inhibition in older adults: a near-infrared spectroscopy study on the Simon task and the flanker task. *Neuroreport* 23, 819–824.
- Kelly, V.E., Eusterbrock, A.J., & Shumway-Cook, A. (2013). Factors influencing dynamic prioritization during dual-task walking in healthy young adults. *Gait Posture* 37, 131–34.
- Kieley, J.M., & Hartley, A.A. (1997). Age-related equivalence of identity suppression in the Stroop color-word task. *Psychol. Aging* 12, 22–29.
- Kirby, N.H. (1976). Sequential effects in two-choice reaction time: Automatic facilitation or subjective expectancy? *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2, 567–577.
- Kitamura, S., Yasuno, F., Yamamoto, A., Kazui, H., Kudo, T., Matsuoka, K., Kiuchi, K., Kosaka, J., Nagatsuka, K., Iida, H., et al. (2016). A structural model of age, grey matter volumes, education, & personality traits. *Psychogeriatr. Off. J. Jpn. Psychogeriatr. Soc.* 16, 46–3.
- Kito, T., Hashimoto, T., Yoneda, T., Katamoto, S., & Naito, E. (2006). Sensory processing during kinesthetic aftereffect following illusory hand movement elicited by tendon vibration. *Brain Res.* 1114, 75–84.
- Kline, D.W. (1987). Ageing and the spatiotemporal discrimination performance of the visual system. *Eye Lond. Engl.* 1, 323–329.
- Kline, D.W., Ikeda, D.M., & Schieber, F.J. (1982). Age and temporal resolution in color vision: When do red and green make yellow? *J. Gerontol.* 37, 705–709.
- Kokmen, E., Bossemeyer, R.W., & Williams, W.J. (1978). Quantitative evaluation of joint motion sensation in an aging population. *J. Gerontol.* 33, 62–67.
- Kouzaki, M., & Masani, K. (2012). Postural sway during quiet standing is related to physiological tremor & muscle volume in young & elderly adults. *Gait Posture* 35, 11–7.
- Koziol, L.F., Budding, D.E., & Chidekel, D. (2012). From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum. *Cerebellum Lond. Engl.* 11, 505–525.
- Kramer, A.F., Hahn, S., Irwin, D.E., & Theeuwes, J. (2000). Age differences in the control of looking behavior: do you know where your eyes have been? *Psychol. Sci.* 11, 210–217.

- L -

- Laessoe, U., Hoeck, H.C., Simonsen, O., & Voigt, M. (2008). Residual attentional capacity amongst young and elderly during dual and triple task walking. *Hum. Mov. Sci.* 27, 496–512.
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1993). Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Exp. Brain Res.* 97, 139–144.
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1996). Upright standing and gait: are there changes in attentional requirements related to aging? *Exp. Aging Res.* 22, 185–98.

- Lakie, M., & Loram, I.D. (2006). Manually controlled human balancing using visual, vestibular and proprioceptive senses involves a common, low frequency neural process. *J. Physiol.* 577, 403–416.
- Laming, J.D.R. (1968). *Information theory of choice-reaction times*. Oxford: Academic Press.
- Landi, F., Cruz-Jentoft, A.J., Liperoti, R., Russo, A., Giovannini, S., Tosato, M., Capoluongo, E., Bernabei, R., & Onder, G. (2013). Sarcopenia and mortality risk in frail older persons aged 80 years and older: results from ilSIRENTE study. *Age Ageing* 42, 203–209.
- Langley, L.K., Overmier, J.B., Knopman, D.S., & Prod'Homme, M.M. (1998). Inhibition and habituation: preserved mechanisms of attentional selection in aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology* 12, 353–366.
- LaRoche, D.P., Cook, S.B., & Mackala, K. (2012). Strength Asymmetry Increases Gait Asymmetry and Variability in Older Women. *Med. Sci. Sports Exerc.* 44, 2172–2181.
- Lawton, M.P., & Brody, E.M. (1969). Assessment of older people: self-maintaining and instrumental activities of daily living. *The Gerontologist* 9, 179–186.
- Léger, L. (2016). *Manuel de psychologie cognitive*. Paris: Editeurs de savoirs, Dunod.
- Lener, R., Liben, L., & Muller, U. (2015). *Handbook of Child Psychology and Developmental Science, Cognitive Processes Volume 2, Cognitive Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Lephart, S.M., Warner, J., Borsa, P.A., & Fu, F.H. (1994). Proprioception of the shoulder joint in healthy, unstable, and surgically repaired shoulders. *J. Shoulder Elbow Surg.* 3, 371–80.
- Leyva, A., Balachandran, A., Britton, J.C., Eltoukhy, M., Kuenze, C., Myers, N.D., & Signorile, J.F. (2017). The development and examination of a new walking executive function test for people over 50years of age. *Physiol. Behav.* 171, 100–109.
- Li, K.Z.H., & Lindenberger, U. (2002). Relations between aging sensory/sensorimotor and cognitive functions. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 26, 777–783.
- Li, S.C., & Lindenberger, U. (1999). Cross-level unification: a computational exploration of the link between deterioration of neurotransmitter systems dedifferentiation of cognitive abilities in old age. In L.G. Nilsson & H.J. Markowitsch (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Memory* (pp. 103-146). Kirkland: Hogrefe & Huber.
- Li, K.Z., Lindenberger, U., Freund, A.M., & Baltes, P.B. (2001). Walking while memorizing: age-related differences in compensatory behavior. *Psychol. Sci.* 12, 230–237.
- Lin, C.-C., Whitney, S.L., Loughlin, P.J., Furman, J.M., Redfern, M.S., Sienko, K.H., & Sparto, P.J. (2015). The effect of age on postural and cognitive task performance while using vibrotactile feedback. *J. Neurophysiol.* 113, 2127–2136.
- Lindenberger, U., & Baltes, P.B. (1994). Sensory functioning and intelligence in old age: a strong connection. *Psychol. Aging* 9, 339–355.
- Lindenberger, U., & Ghisletta, P. (2009). Cognitive and sensory declines in old age: gauging the evidence for a common cause. *Psychol. Aging* 24, 1–16.

- Liu, J.X., Eriksson P.O., Thornell, L.E., & Pedrosa-Domellof, F. (2005). Fiber content and myosin heavy chain composition of muscle spindles in aged human biceps brachii. *J. Histochem. Cytochem.* 53, 445-454.
- Logan, & Cowan (1984). On the ability to inhibit thought and action: A theory of an act of control. *Psychol. Rev.* 91, 295–327.
- Logan, G.D., Schachar, R.J., & Tannock, R. (1997). Impulsivity and Inhibitory Control. *Psychol. Sci.* 8, 60–64.
- Lord, S.R., & Dayhew, J. (2001). Visual risk factors for falls in older people. *J. Am. Geriatr. Soc.* 49, 508–515.
- Lord, S.R., & Fitzpatrick, R.C. (2001). Choice stepping reaction time: a composite measure of falls risk in older people. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 56, M627-632.
- Lord, S.R., Clark, R.D., & Webster, I.W. (1991). Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J. Gerontol.* 46, M69-76.
- Lord, S.R., Lloyd, D.G., & Li, S.K. (1996). Sensori-motor function, gait patterns and falls in community-dwelling women. *Age Ageing* 25, 292–299.
- Lord, S.R., Smith, S.T., & Menant, J.C. (2010). Vision and falls in older people: risk factors and intervention strategies. *Clin. Geriatr. Med.* 26, 569–581.
- Lorenceau, J. (1996). Motion integration with dot patterns: effects of motion noise and structural information. *Vision Res.* 36, 3415–3427.
- Luck, S.J., & Gold, J.M. (2008). The Construct of Attention in Schizophrenia. *Biol. Psychiatry* 64, 34–39.
- Luria, A.R. (1966). *Higher Cortical Functions in Man*. London: Tavistock.
- Luria, A.R. (1973). *Working brain*. London: Penguin books.
- Lustig, C., Hasher, L., & Zacks, R.T. (2007). Inhibitory deficit theory: Recent developments in a “new view.” In D. S. Gorfein & C. M. MacLeod (Eds.), *Inhibition in Cognition* (pp. 145-162). Washington: American psychological association.

- M -

- Macaluso, A., & De Vito, G. (2004). Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *Eur. J. Appl. Physiol.* 91, 450–472.
- MacDonald, A.W., Cohen, J.D., Stenger, V.A., & Carter, C.S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science* 288, 1835–1838.
- MacLeod, C.M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychol. Bull.* 109, 163–203.
- MacLeod, C.M. (1999). The item and list methods of directed forgetting: test differences and the role of demand characteristics. *Psychon. Bull. Rev.* 6, 123–129.

- Maden-Wilkinson, T.M., McPhee, J.S., Jones, D.A., & Degens, H. (2015). Age-Related Loss of Muscle Mass, Strength, and Power and Their Association With Mobility in Recreationally-Active Older Adults in the United Kingdom. *J. Aging Phys. Act.* 23, 352–360.
- Madoglou, A. (2011). Stratégies de représentations internes et externes de mémoire et d'oubli. *Bull. Psychol.* 504, 515–531.
- Maki, B.E. (1997). Gait changes in older adults: predictors of falls or indicators of fear. *J. Am. Geriatr. Soc.* 45, 313–320.
- Maki, B.E., & McIlroy, W.E. (1996). Postural control in the older adult. *Clin. Geriatr. Med.* 12, 635–658.
- Maki, B.E., Holliday, P., & Topper, A. (1994). A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population. *J. Gerontol.* 49, 72-84.
- Marsh, A.P., & Geel, S.E. (2000). The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait Posture* 12, 105–113.
- Martin, K.L., Blizzard, L., Srikanth, V.K., Wood, A., Thomson, R., Sanders, L.M., & Callisaya, M.L. (2013). Cognitive function modifies the effect of physiological function on the risk of multiple falls--a population-based study. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 68, 1091–1097.
- Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog. Neurobiol.* 38, 35–56.
- Massion, J. (1998). Postural control systems in developmental perspective. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 22, 465–472.
- May, C.P., & Hasher, L. (1998). Synchrony effects in inhibitory control over thought and action. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 24, 363–379.
- May, C.P., Kane, M.J., & Hasher, L. (1995). Determinants of negative priming. *Psychol. Bull.* 118, 35–54.
- Mayas, J., Fuentes, L.J., & Ballesteros, S. (2012). Stroop interference and negative priming (NP) suppression in normal aging. *Arch. Gerontol. Geriatr.* 54, 333–338.
- Mazaheri, M., Roerdink, M., Bood, R.J., Duysens, J., Beek, P.J., & Peper, C. (Lieke) E. (2014). Attentional costs of visually guided walking: Effects of age, executive function and stepping-task demands. *Gait Posture* 40, 182–186.
- McClelland, J.L. (1979). On the time relation of mental processes: An examination of systems of processes in cascade. *Psychol. Rev.* 86, 287–330.
- McCulloch, K.L., Mercer, V., Giuliani, C., & Marshall, S. (2009). Development of a clinical measure of dual-task performance in walking: reliability and preliminary validity of the Walking and Remembering Test. *J. Geriatr. Phys. Ther.* 2001 32, 2–9.
- Melzer, I., & Oddsson, L.I.E. (2004). The effect of a cognitive task on voluntary step execution in healthy elderly and young individuals. *J. Am. Geriatr. Soc.* 52, 1255–1262.
- Melzer, I., Kurz, I., Shahar, D., Levi, M., & Oddsson, L. (2007). Application of the voluntary step execution test to identify elderly fallers. *Age Ageing* 36, 532–537.

- Mendelson, D.N., Redfern, M.S., Nebes, R.D., & Richard Jennings, J. (2010). Inhibitory processes relate differently to balance/reaction time dual tasks in young and older adults. *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 17, 1–18.
- Mille, M.-L., Johnson-Hilliard, M., Martinez, K.M., Zhang, Y., Edwards, B.J., & Rogers, M.W. (2013). One Step, Two Steps, Three Steps More ... Directional Vulnerability to Falls in Community-Dwelling Older People. *J. Gerontol. Ser. A* 68, 1540–1548.
- Milner, B. (1964). Some effects of frontal lobectomy in man. In J.M. Warren & K. Akert (Eds.), *The Frontal Granular Cortex and Behaviour* (pp. 313-334). New York: Mc Graw-hill.
- Mirelman, A., Herman, T., Brozgol, M., Dorfman, M., Sprecher, E., Schweiger, A., Giladi, N., & Hausdorff, J.M. (2012). Executive function and falls in older adults: new findings from a five-year prospective study link fall risk to cognition. *PLoS One* 7, e40297.
- Misra, N., Mahajan, K.K., & Maini, B.K. (1985). Comparative study of visual and auditory reaction time of hands and feet in males and females. *Indian J. Physiol. Pharmacol.* 29, 213–218.
- Mitrushina, M., Boone, K., Razani, J., & D'Elia (2005). *Handbook of normative data for neuropsychological assessment* (second edition). New-York: Oxford University Press.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A., & Wager, T.D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: a latent variable analysis. *Cognit. Psychol.* 41, 49–100.
- Moghadam, M., Ashayeri, H., Salavati, M., Sarafzadeh, J., Taghipoor, K.D., Saeedi, A., & Salehi, R. (2011). Reliability of center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait Posture* 33, 651–655.
- Monette, S., & Bigras, M. (2008). La mesure des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. *Can. Psychol.* 49, 323–341.
- Montés-Micó, R., Bueno, I., Candel, J., & Am, A. (2000). Eye-hand and eye-foot visual reaction times of young soccer players. *Optom. St Louis Mo* 71, 775–780.
- Morales-Vives, F., & Vigil-Colet, A. (2012). Are old people so gentle? Functional and dysfunctional impulsivity in the elderly. *Int. Psychogeriatr.* 24, 465–471.
- Morisawa, Y. (1998). Morphological study of mechanoreceptors on the coracoacromial ligament. *J. Orthop. Sci.* 3, 102–110.
- Moroni, C., & Bayard, S. (2009). [Inhibitory process: what evolution after the age of 50?]. *Psychol. Neuropsychiatr. Vieil.* 7, 121–129.
- Moroni, C., & Laurent, B. (2006). [Pain and cognition]. *Psychol. Neuropsychiatr. Vieil.* 4, 21–30.
- Mostofsky, S.H., & Simmonds, D.J. (2008). Response inhibition and response selection: two sides of the same coin. *J. Cogn. Neurosci.* 20, 751–761.
- Mudar, R.A., Chiang, H.-S., Maguire, M.J., Spence, J.S., Eroh, J., Kraut, M.A., & Hart, J. (2015). Effects of age on cognitive control during semantic categorization. *Behav. Brain Res.* 287, 285–293.

Muir, J.W., Kiel, D.P., Hannan, M., Magaziner, J., & Rubin, C.T. (2013). Dynamic parameters of balance which correlate to elderly persons with a history of falls. *PLoS One* 8, e70566.

Müller, M.L.T.M., Redfern, M.S., & Jennings, J.R. (2007). Postural prioritization defines the interaction between a reaction time task and postural perturbations. *Exp. Brain Res.* 183, 447–456.

- N -

Nadkarni, N.K., Nunley, K.A., Aizenstein, H., Harris, T.B., Yaffe, K., Satterfield, S., Newman, A.B., & Rosano, C. (2014). Association Between Cerebellar Gray Matter Volumes, Gait Speed, and Information-Processing Ability in Older Adults Enrolled in the Health ABC Study. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 69, 996–1003.

Narici, M.V., & Maffulli, N. (2010). Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. *Br. Med. Bull.* 95, 139–159.

Nashner, L.M., Black, F.O., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 2, 536–544.

Nassauer, K.W., & Halperin, J.M. (2003). Dissociation of perceptual and motor inhibition processes through the use of novel computerized conflict tasks. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 9, 25–30.

Nelson, J.K., Reuter-Lorenz, P., Sylvester, C.-Y.C., Jonides, J., & Smith, E.E. (2003). Dissociable neural mechanisms underlying response-based and familiarity-based conflict in working memory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100, 11171–11175.

Nevitt, M.C., Cummings, S.R., Kidd, S., & Black, D. (1989). Risk Factors for Recurrent Nonsyncopal Falls: A Prospective Study. *JAMA* 261, 2663–2668.

Newell, G.S., & Mansfield, N.J. (2008). Evaluation of reaction time performance and subjective workload during whole-body vibration exposure while seated in upright and twisted postures with and without armrests. *Int. J. Ind. Ergon.* 38, 499–508.

Nielson, K.A., Langenecker, S.A., & Garavan, H. (2002a). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychol. Aging* 17, 56–71.

Nielson, K.A., Langenecker, S.A., & Garavan, H. (2002b). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychol. Aging* 17, 56–71.

Nigg, J.T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychol. Bull.* 126, 220–246.

Norman, D.A., & Shallice, T. (1980). Attention to action: Willed and automatic control of behavior (San Diego: University of California).

Nutt, J.G., Marsden, C.D., & Thompson, P.D. (1993). Human walking and higher-level gait disorders, particularly in the elderly. *Neurology* 43, 268–279.

- O -

O’Flaherty, E.J. (2000). Modeling normal aging bone loss, with consideration of bone loss in osteoporosis. *Toxicol. Sci. Off. J. Soc. Toxicol.* 55, 171–188.

- Oie, K., Kiemel, T., & Jeka, J. (2002). Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 14, 164–76.
- O’Leary, M.J., & Barber, P.J. (1993). Interference effects in the Stroop and Simon paradigms. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 19, 830–844.
- Olincy, A., Ross, R.G., Youngd, D.A., & Freedman, R. (1997). Age diminishes performance on an antisaccade eye movement task. *Neurobiol. Aging* 18, 483–489.
- Olivier, I., Cuisinier, R., Vaugoyeau, M., Nougier, V., & Assaiante, C. (2007). Dual-task study of cognitive and postural interference in 7-year-olds and adults. *Neuroreport* 18, 817–821.
- Olk, B., & Jin, Y. (2011). Effects of aging on switching the response direction of pro- and antisaccades. *Exp. Brain Res.* 208, 139–150.
- Onambele, G.L., Narici, M.V., & Maganaris, C.N. (2006). Calf muscle-tendon properties and postural balance in old age. *J. Appl. Physiol. Bethesda Md 1985* 100, 2048–2056.
- O’Sullivan, J.D., Said, C.M., Dillon, L.C., Hoffman, M., & Hughes, A.J. (1998). Gait analysis in patients with Parkinson’s disease and motor fluctuations: influence of levodopa and comparison with other measures of motor function. *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.* 13, 900–906.
- O’Sullivan, M., Jones, D.K., Summers, P.E., Morris, R.G., Williams, S.C., & Markus, H.S. (2001). Evidence for cortical “disconnection” as a mechanism of age-related cognitive decline. *Neurology* 57, 632–638.
- Overstall, P.W., Exton-Smith, A.N., Imms, F.J., & Johnson, A.L. (1977). Falls in the elderly related to postural imbalance. *Br. Med. J.* 1, 261–264.
- Owsley, C., Sekuler, R., & Siemsen, D. (1983). Contrast sensitivity throughout adulthood. *Vision Res.* 23, 689–699.

- P -

- Padilla-Medina, J.A., Prado-Olivarez, J., Amador-Licona, N., Cardona-Torres, L.M., Galicia-Resendiz, D., & Diaz-Carmona, J. (2013). Study on simple reaction and choice times in patients with type I diabetes. *Comput. Biol. Med.* 43, 368–376.
- Pajala, S., Era, P., Koskenvuo, M., Kaprio, J., Törmäkangas, T., & Rantanen, T. (2008). Force platform balance measures as predictors of indoor and outdoor falls in community-dwelling women aged 63-76 years. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 63, 171–178.
- Palluel, E., Nougier, V., & Olivier, I. (2010). Postural control and attentional demand during adolescence. *Brain Res.* 1358, 151–159.
- Paquette, C. (2009). *Guide des meilleures pratiques en réadaptation cognitive*. Presse de l’Université du Québec.
- Park, D., Polk, T.A., Park, R., Minear, M., Savage, A., & Smith, M. (2004). Aging reduces neural specialization in ventral visual cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101, 13091–5.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychol. Bull.* 116, 220–244.

- Patla, A.E., Frank, J.S., Winter, D.A., Rietdyk, S., Prentice, S., & Prasad, S. (1993). Age-related changes in balance control system: initiation of stepping. *Clin. Biomech. Bristol Avon* 8, 179–184.
- Paul, S.S., Ada, L., and Canning, C.G. (2005). Automaticity of walking – implications for physiotherapy practice. *Phys. Ther. Rev.* 10, 15–23.
- Paulus, W.M., Straube, A., & Brandt, T. (1984). Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain J. Neurol.* 107 (Pt 4), 1143–1163.
- Pellecchia, G.L. (2003). Postural sway increases with attentional demands of concurrent cognitive task. *Gait Posture* 18, 29–34.
- Pendergast, D.R., Fisher, N.M., & Calkins, E. (1993). Cardiovascular, neuromuscular, and metabolic alterations with age leading to frailty. *J. Gerontol.* 48, 61–67.
- Perrin, P.P., Jeandel, C., Perrin, C.A., & Béné, M.C. (1997). Influence of visual control, conduction, and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology* 43, 223–231.
- Perrochon, A., Kemoun, G., Watelain, E., & Berthoz, A. (2013). Walking Stroop carpet: an innovative dual-task concept for detecting cognitive impairment. *Clin. Interv. Aging* 8, 317–328.
- Persad, C.C., Giordani, B., Chen, H.C., Ashton-Miller, J.A., Alexander, N.B., Wilson, C.S., Berent, S., Guire, K., & Schultz, A.B. (1995). Neuropsychological predictors of complex obstacle avoidance in healthy older adults. *J. Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc. Sci.* 50, 272–277.
- Peterka, R.J., & Loughlin, P.J. (2004). Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *J. Neurophysiol.* 91, 410–423.
- Petersen, R. (2004). Mild cognitive impairment as diagnostic entity. *J. Intern. Med.* 256, 183–94.
- Peterson, B.S., Skudlarski, P., Gatenby, J.C., Zhang, H., Anderson, A.W., & Gore, J.C. (1999). An fMRI study of Stroop word-color interference: evidence for cingulate subregions subserving multiple distributed attentional systems. *Biol. Psychiatry* 45, 1237–1258.
- Petrella, R.J., Lattanzio, P.J., & Nelson, M.G. (1997). Effect of age and activity on knee joint proprioception. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 76, 235–241.
- Pfister, M., Lue, J.-C., Stefanini, F., Falabella, P., Dustin, L., Koss, M., & Humayun, M. (2014). Comparison of reaction response time between hand and foot controlled devices in simulated microsurgical testing. *BioMed Res. Int.* 2014, 1–8.
- Pijnappels, M., van der Burg, P.J.C.E., Reeves, N.D., & van Dieën, J.H. (2008). Identification of elderly fallers by muscle strength measures. *Eur. J. Appl. Physiol.* 102, 585–592.
- Pirozzolo, F.J., Christensen, K.J., Ogle, K.M., Hansch, E.C., & Thompson, W.G. (1981). Simple and choice reaction time in dementia: clinical implications. *Neurobiol. Aging* 2, 113–17.
- Plummer-D'Amato, P., Altmann, J., L., & Reilly, K. (2011). Dual-task effects of spontaneous speech and executive function on gait in aging: exaggerated effects in slow walkers. *Gait Posture* 33, 233–237.

- Plummer-D'Amato, P., Brancato, B., Dantowitz, M., Birken, S., Bonke, C., & E, E. (2012). Effects of gait and cognitive task difficulty on cognitive-motor interference in aging. *J. Aging Res.* 2012, 583894–583894.
- Posner, M.I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. Bonwhuis (Eds.), *Attention and Performance X: Control of Language Processes* (pp. 551-556). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Posner, M.I., & Petersen, S.E. (1990). The attention system of the human brain. *Annu. Rev. Neurosci.* 13, 25–42.
- Posner, M.I., & Rothbart, M.K. (1992). Les mécanismes de l'attention et l'expérience consciente. *Rev. Neuropsychol.* 2, 85–115.
- Posner, M.I., & Snyder, C.R.R. (1975). Facilitation and inhibition processing of signals. In J. Requin (Ed.), *Attention and Performance V* (pp. 669-681). New York: Erlbaum.
- Potocanac, Z., Smulders, E., Pijnappels, M., Verschueren, S., & Duysens, J. (2015). Response inhibition and avoidance of virtual obstacles during gait in healthy young and older adults. *Hum. Mov. Sci.* 39, 27–40.
- Potter, L.M., & Grealy, M.A. (2006). Aging and inhibitory errors on a motor shift of set task. *Exp. Brain Res.* 171, 56–66.
- Prado, J.M., Stoffregen, T.A., & Duarte, M. (2007). Postural sway during dual tasks in young and elderly adults. *Gerontology* 53, 274–281.
- Prieto, T.E., Myklebust, J.B., Hoffmann, R.G., Lovett, E.G., & Myklebust, B.M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 43, 956–966.
- Prince, F., Corriveau, H., Hebert, R., & Winter, D.A. (1997). Gait in the elderly. *Gait Posture* 128–135.
- Proske, U. (1997). The Mammalian Muscle Spindle. *Physiology* 12, 37–42.
- Proske, U. (2005). What is the role of muscle receptors in proprioception? *Muscle Nerve* 31, 780–787.
- Proske, U., & Gandevia, S.C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol. Rev.* 92, 1651–1697.
- Pyykkö, I., Jäntti, P., & Aalto, H. (1988a). Postural control in the oldest olds. *Adv. Otorhinolaryngol.* 41, 146–151.
- Pyykkö, I., Aalto, H., Hytönen, M., Starck, J., Jantti, P., & Ramsay, H. (1988b). Effect of age on postural control. In B. Ambalard, A. Berthoz & F. Clarac (Eds.), *Posture and Gait: Development, Adaptation and Modulation* (pp. 95-104). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

- Q - R -

- Qiu, F., Cole, M.H., Davids, K.W., Hennig, E.M., Silburn, P.A., Netscher, H., & Kerr, G.K. (2012). Enhanced somatosensory information decreases postural sway in older people. *Gait Posture* 35, 630–635.

- Rabbitt, P. (1997). Introduction: Methodologies and models in the study of executive function. In P. Rabbitt (Ed.), *Methodology of Frontal and Executive Function* (pp. 1-38). Hove: Psychology press.
- Rabbitt, P. (1965). An age-decrement in the ability to ignore irrelevant information. *J. Gerontol.* 20, 233–238.
- Ramos-Goicoa, M., Galdo-Álvarez, S., Díaz, F., & Zurrón, M. (2016). Effect of Normal Aging and of Mild Cognitive Impairment on Event-Related Potentials to a Stroop Color-Word Task. *J. Alzheimers Dis. JAD* 52, 1487–1501.
- Raz, N., Gunning, F.M., Head, D., Dupuis, J.H., McQuain, J., Briggs, S.D., Loken, W.J., Thornton, A.E., & Acker, J.D. (1997). Selective aging of the human cerebral cortex observed in vivo: differential vulnerability of the prefrontal gray matter. *Cereb. Cortex N. Y. N* 1991 7, 268–282.
- Redfern, M.S., Jennings, J.R., Martin, C., & Furman, J.M. (2001). Attention influences sensory integration for postural control in older adults. *Gait Posture* 14, 211–216.
- Redfern, M.S., Müller, M.L.T.M., Jennings, J.R., & Furman, J.M. (2002). Attentional dynamics in postural control during perturbations in young and older adults. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 57, B298-303.
- Redfern, M.S., Jennings, J.R., Mendelson, D., & Nebes, R.D. (2009). Perceptual inhibition is associated with sensory integration in standing postural control among older adults. *J. Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc. Sci.* 64, 569–576.
- Reilly, D.S., van Donkelaar, P., Saavedra, S., & Woollacott, M.H. (2008). Interaction between the development of postural control and the executive function of attention. *J. Mot. Behav.* 40, 90–102.
- Remaud, A., Thuong-Cong, C., & Bilodeau, M. (2016). Age-Related Changes in Dynamic Postural Control and Attentional Demands are Minimally Affected by Local Muscle Fatigue. *Front. Aging Neurosci.* 7.
- Ribeiro, F., & Oliveira, J. (2010). Effect of physical exercise and age on knee joint position sense. *Arch. Gerontol. Geriatr.* 51, 64–67.
- Rigal, R. (1995). *Motricité humaine : Tome 1, Fondements et applications pédagogiques* (Sainte-Foy: Presses de l'Université du Québec).
- Rodenburg, M., Maas, A.J., & Stassen, H.P. (1981). Thresholds for the perception of rotation: variability, psychometric curves, and comparison with hearing thresholds. *Biol. Cybern.* 42, 23–28.
- Roelofs, A. (2003). Goal-referenced selection of verbal action: modeling attentional control in the Stroop task. *Psychol. Rev.* 110, 88–125.
- Roerdink, M., Hlavackova, P., & Vuillerme, N. (2011). Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: a comparison between sitting and standing postures. *Hum. Mov. Sci.* 30, 203–212.
- Rogers, M.W., Kukulka, C.G., Brunt, D., Cain, T.D., & Hanke, T.A. (2001). The influence of stimulus cue on the initiation of stepping in young and older adults. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 82, 619–624.

- Rogers, M.W., Hedman, L.D., Johnson, M.E., Martinez, K.M., & Mille, M.-L. (2003a). Triggering of protective stepping for the control of human balance: age and contextual dependence. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 16, 192–198.
- Rogers, M.W., Johnson, M.E., Martinez, K.M., Mille, M.-L., & Hedman, L.D. (2003b). Step training improves the speed of voluntary step initiation in aging. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 58, 46–51.
- Röijezon, U., Clark, N.C., & Treleaven, J. (2015). Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 1: Basic science and principles of assessment and clinical interventions. *Man. Ther.* 20, 368–377.
- Roll, J.P. (2003). Animer virtuellement le corps humain. Pour Sci. Dossier “*les illusions des sens*,” 86–93.
- Roll, J.P., & Vedel, J.P. (1982). Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography. *Exp. Brain Res.* 47, 177–190.
- Roll, J.P., Vedel, J.P., & Ribot, E. (1989). Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp. Brain Res.* 76, 213–222.
- Roll, J.P., Hay, L., Quoniam, C., & Roll, R. (1992). Muscle proprioception: a powerful sensory input for postural adaptation in man. In B. Vellas, M. Toupet, L. Rubenstein, J.J. Albaredo, Y. Christen (Eds.), *Falls, Balance and Gait Disorders in the Elderly* (pp. 161-182). Paris: Elsevier.
- Rosano, C., Studenski, S.A., Aizenstein, H.J., Boudreau, R.M., Longstreth, W.T., & Newman, A.B. (2012). Slower gait, slower information processing and smaller prefrontal area in older adults. *Age Ageing* 41, 58–64.
- Rosenberg, I.H. (1997). Sarcopenia: origins and clinical relevance. *J. Nutr.* 127, 990S–991S.
- Rosenhall, U., & Rubin, W. (1975). Degenerative Changes in the Human Vestibular Sensory Epithelia. *Acta Otolaryngol.* (Stockh.) 79, 67–80.
- Rothwell, J. (1994). *Control of human voluntary movement*. London: Chapman & Hall.
- Rougier, P. (2001). Le maintien d'une posture d'inclinaison vers l'avant modifie davantage les amplitudes des déplacements du centre des pressions que celles du centre de gravité. *Ann. Réadapt. Médecine Phys.* 44, 533–541.
- Royall, D., Cordes, J., & Polk, M. (1998). CLOX: an executive clock drawing task. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 64, 588–594.
- Rucco, R., Agosti, V., Jacini, F., Sorrentino, P., Varriale, P., De Stefano, M., Milan, G., Montella, P., & Sorrentino, G. (2017). Spatio-temporal and kinematic gait analysis in patients with Frontotemporal dementia and Alzheimer's disease through 3D motion capture. *Gait Posture* 52, 312–317.
- Russell, B.A., Summers, M.J., Tranent, P.J., Palmer, M.A., Cooley, P.D., & Pedersen, S.J. (2016). A randomised control trial of the cognitive effects of working in a seated as opposed to a standing position in office workers. *Ergonomics* 59, 737–744.

- Sabzi, A. (2012). The Effect of Different Fatigue Protocols on Choice Reaction Time. *Middle-East J. Sci. Res.* 12, 1092–1096.
- Salthouse, T.A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychol. Rev.* 103, 403–428.
- Salthouse, T.A., Atkinson, T., & Berish, D. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *J. Exp. Psychol. Gen.* 132, 566–94.
- Sanders, A.F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychol. (Amst.)* 53, 64–97.
- Sanders, A.F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete versus continuous processing of information. *Acta Psychol. (Amst.)* 123–167.
- Sanders, A.F. (1998). Elements of Human Performance: Reaction Processes and Attention. In N.J., Mahwah (Ed.), *Self-Control in Society, Mind, and Brain* (pp. 507-556). New Jersey: Erlbaum.
- Schäfer, S., Huxhold, O., & Lindenberger, U. (2006). Healthy mind in healthy body? A review of sensorimotor–cognitive interdependencies in age. *Eur. Rev. Aging Phys. Act.* 3, 45–54.
- Schlesinger, A., Redfern, M.S., Dahl, R.E., & Jennings, J.R. (1998). Postural control, attention and sleep deprivation. *Neuroreport* 9, 49–52.
- Schmiedt-Fehr, C., Schwendemann, G., Herrmann, M., & Basar-Eroglu, C. (2007). Parkinson's disease and age-related alterations in brain oscillations during a Simon task. *Neuroreport* 18, 277–281.
- Schneider, W., & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychol. Rev.* 84, 1–66.
- Schoene, D., Smith, S.T., Davies, T.A., Delbaere, K., & Lord, S.R. (2014). A Stroop Stepping Test (SST) using low-cost computer game technology discriminates between older fallers and non-fallers. *Age Ageing* 43, 285–289.
- Schoene, D., Valenzuela, T., Toson, B., Delbaere, K., Severino, C., Garcia, J., Davies, T.A., Russell, F., Smith, S.T., & Lord, S.R. (2015). Interactive Cognitive-Motor Step Training Improves Cognitive Risk Factors of Falling in Older Adults – A Randomized Controlled Trial. *PLoS ONE* 10.
- Schoene, D., Delbaere, K., & Lord, S.R. (2017). Impaired response selection during stepping predicts falls in older people: A cohort study. *J. Am. Med. Dir. Assoc.* 1–7.
- Schrack, J.A., Simonsick, E.M., & Ferrucci, L. (2010). The energetic pathway to mobility loss: an emerging new framework for longitudinal studies on aging. *J. Am. Geriatr. Soc.* 58, S329–S336.
- Schraefel, M., Kenneth, J., & Andersen, L. (2012). Assessing the Effect of Self-positioning on Cognitive Executive Function. *Ergonomics* 2, 1–4.
- Schrodt, L., Mercer, V., Giuliani, C., & Hartman, M. (2004). Characteristics of stepping over an obstacle in community dwelling older adults under dual-task conditions. *Gait Posture* 19, 279–87.

- Sebastian, A., Baldermann, C., Feige, B., Katzev, M., Scheller, E., Hellwig, B., Lieb, K., Weiller, C., Tüscher, O., & Klöppel, S. (2013). Differential effects of age on subcomponents of response inhibition. *Neurobiol. Aging* 34, 2183–2193.
- Sego, S.A., Golding, M., & Gottlob, R. (2006). Directed forgetting in older adults using the item and list methods. *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 13, 95–114.
- Sekuler, R., & Hutman, L.P. (1980). Spatial vision and aging. Contrast sensitivity. *J. Gerontol.* 35, 692–9.
- Seo, E.H., Lee, D.Y., Choo, I.H., Kim, S.G., Kim, K.W., Youn, J.C., Jhoo, J.H., & Woo, J.I. (2008). Normative study of the Stroop Color and Word Test in an educationally diverse elderly population. *Int. J. Geriatr. Psychiatry* 23, 1020–1027.
- Sergeant, J. (1996). A theory of attention: An information processing perspective. In G.R. Lyon & N.A. Krasnegor (Eds.), *Attention, Memory, & Executive Function* (pp. 57-69). Baltimore: Brookes.
- Seymour, P. (1977). Conceptual encoding and locus of the Stroop effect. *Q. J. Exp. Psychol.* 29, 245–65.
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 298, 199–209.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. New York: Cambridge University Press.
- Sheldon, J.H. (1963). The effect of age on the control of sway. *Gerontol. Clin.* 5, 129–38.
- Shelton, J., & Kumar, G.P. (2010). Comparison between Auditory and Visual Simple Reaction Times. *Neurosci. Med.* 1, 30–32.
- Sheppard, L.D., & Vernon (2008). Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research. *Personal. Individ. Differ.* 44, 535–551.
- Sherrington, C., Lord, S.R., & Finch, C.F. (2004). Physical activity interventions to prevent falls among older people: update of the evidence. *J. Sci. Med. Sport* 7, 43–51.
- Shimada, H., Makizako, H., Lee, S., Doi, T., Lee, S., Tsutsumimoto, K., Harada, K., Hotta, R., Bae, S., Nakakubo, S., et al. (2016). Impact of Cognitive Frailty on Daily Activities in Older Persons. *J. Nutr. Health Aging* 20, 729–735.
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: the effect of sensory context. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 55, M10-16.
- Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K.A., & Baldwin, M. (1997). The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 52, M232-240.
- Simon, J.R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *J. Exp. Psychol.* 81, 174–176.
- Simonen, R.L., Videman, T., Battié, M.C., & Gibbons, L.E. (1995). Comparison of foot and hand reaction times among men: a methodologic study using simple and multiple-choice repeated measurements. *Percept. Mot. Skills* 80, 1243–1249.

- Simoni, D., Rubbieri, G., Baccini, M., Rinaldi, L., Becheri, D., Forconi, T., Mossello, E., Zanieri, S., Marchionni, N., & Di Bari, M. (2013). Different motor tasks impact differently on cognitive performance of older persons during dual task tests. *Clin. Biomech. Bristol Avon* 28, 692–696.
- Siu, K.-C., Chou, L.-S., Mayr, U., Donkelaar, P. van, & Woollacott, M.H. (2008). Does Inability to Allocate Attention Contribute to Balance Constraints during Gait in Older Adults? *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 63, 1364.
- Skinner, H.B., Barrack, R.L., & Cook, S.D. (1984). Age-related decline in proprioception. *Clin. Orthop.* 184, 208–211.
- Soetens, E. (1998). Localizing sequential effects in serial choice reaction time with the information reduction procedure. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 24, 547–568.
- Sorensen, K.L., Hollands, M.A., & Patla, E. (2002). The effects of human ankle muscle vibration on posture and balance during adaptive locomotion. *Exp. Brain Res.* 143, 24–34.
- Soumaré, A., Tavernier, B., Alperovitch, A., Tzourio, C., & Elbaz, A. (2009). A cross-sectional and longitudinal study of the relationship between walking speed and cognitive function in community-dwelling elderly people. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 64, 1058–65.
- Sowell, E.R., Peterson, B.S., Thompson, P.M., Welcome, S.E., Henkenius, A.L., & Toga, A.W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nat. Neurosci.* 6, 309–315.
- Sparrow, W.A., Bradshaw, E.J., Lamoureux, E., & Tirosh, O. (2002). Ageing effects on the attention demands of walking. *Hum. Mov. Sci.* 21, 961–972.
- Sparto, P.J., Fuhrman, S.I., Redfern, M.S., Jennings, J.R., Perera, S., Nebes, R.D., & Furman, J.M. (2013). Postural adjustment errors reveal deficits in inhibition during lateral step initiation in older adults. *J. Neurophysiol.* 109, 415–428.
- Sparto, P.J., Fuhrman, S.I., Redfern, M.S., Perera, S., Richard Jennings, J., Alghwiri, A.A., & Furman, J.M. (2014a). Postural adjustment errors during lateral step initiation in older and younger adults. *Exp. Brain Res.* 232, 3977–3989.
- Sparto, P.J., Jennings, J.R., Furman, J.M., & Redfern, M.S. (2014b). Lateral step initiation behavior in older adults. *Gait Posture* 39, 799–803.
- Spieler, D.H., Balota, D.A., & Faust, M.E. (1996). Stroop performance in healthy younger and older adults and in individuals with dementia of the Alzheimer's type. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 22, 461–479.
- Spreng, R.N., Wojtowicz, M., & Grady, C.L. (2010). Reliable differences in brain activity between young and old adults: A quantitative meta-analysis across multiple cognitive domains. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 34, 1178–1194.
- Springer, S., Giladi, N., Peretz, C., Yogev, G., Simon, E.S., & Hausdorff, J.M. (2006). Dual-tasking effects on gait variability: the role of aging, falls, and executive function. *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.* 21, 950–957.

- St George, R.J., Fitzpatrick, R.C., Rogers, M.W., & Lord, S.R. (2007). Choice stepping response and transfer times: effects of age, fall risk, and secondary tasks. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 62, 537–542.
- Stamenković, D., Popovic, V., & Tirovic, M. (2014). Operator's reaction time prolongation induced by whole-body vibration. *FME Trans.* 42, 297–304.
- Stanovich, K., & Pachella R. (1977). Encoding, stimulus-response compatibility, and stages of processing. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 3, 411-421.
- Stawarczyk, D., Grandjean, J., Salmon, E., & Collette, F. (2012). Perceptual and motor inhibitory abilities in normal aging and Alzheimer disease (AD): A preliminary study. *Arch. Gerontol. Geriatr.* 54, e152–e161.
- Stelmach, G.E., & Nahom, A. (1992). Cognitive-motor abilities of the elderly driver. *Hum. Factors* 34, 53–65.
- Sternberg, S. (1969). Discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and Performance II* (pp. 276-315). Amsterdam: Acta psychologica.
- Stirling, N. (1979). Stroop interference: An input and an output phenomenon. *Q. J. Exp. Psychol.* 121–132.
- Stroop, J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *J. Exp. Psychol.* 18, 643–662.
- Sturnieks, D.L., Menant, J., Vanrenterghem, J., Delbaere, K., Fitzpatrick, R.C., & Lord, S.R. (2012). Sensorimotor and neuropsychological correlates of force perturbations that induce stepping in older adults. *Gait Posture* 36, 356–360.
- Stuss, D.T., & Alexander, M.P. (2007). Is there a dysexecutive syndrome? *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 362, 901–915.
- Sukits, A.L., Nebes, R.D., Chambers, A.J., Ledgerwood, A., Halligan, E.M., Perera, S., & Cham, R. (2014). Intra-individual variability in gait and in cognitive performance are not related in the elderly. *Aging Neuropsychol. Cogn.* 21, 283–295.
- Sullivan, M.P., & Faust, M.E. (1993). Evidence for identity inhibition during selective attention in old adults. *Psychol. Aging* 8, 589–598.
- Sullivan, E.V., Rose, J., Rohlfing, T., & Pfefferbaum, A. (2009). Postural sway reduction in aging men and women: relation to brain structure, cognitive status, and stabilizing factors. *Neurobiol. Aging* 30, 793–807.

- T -

- Takacs, J., Carpenter, M., Garland, S., & Hunt, M. (2013). The Role of Neuromuscular Changes in Aging and Knee Osteoarthritis on Dynamic Postural Control. *Aging Dis.* 4, 84–99.
- Taki, Y., Kinomura, S., Sato, K., Goto, R., Wu, K., Kawashima, R., & Fukuda, H. (2011). Correlation between gray/white matter volume and cognition in healthy elderly people. *Brain Cogn.* 75, 170–176.

- Teasdale, N., & Simoneau, M. (2001). Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration. *Gait Posture* 14, 203–210.
- Teasdale, N., Bard, C., LaRue, J., & Fleury, M. (1993). On the cognitive penetrability of posture control. *Exp. Aging Res.* 19, 1–13.
- Theios, J. (1975). The components of response latency in simple human information processing tasks. In M. Rabbit et S. Dornic (Eds.), *Attention and Performance V* (pp. 418-440). London: Academic press.
- Thomas, D.P., & Whitney, R.J. (1959). Postural movements during normal standing in man. *J. Anat.* 93, 524–539.
- Thompson, C., Bélanger, M., & Fung, J. (2007). Effects of bilateral Achilles tendon vibration on postural orientation and balance during standing. *Clin. Neurophysiol. Off. J. Int. Fed. Clin. Neurophysiol.* 118, 2456–2467.
- Tinetti, M.E., Richman, D., & Powell, L. (1990). Falls efficacy as a measure of fear of falling. *J. Gerontol.* 45, P239-243.
- Tipper, S.P. (1985). The negative priming effect: inhibitory priming by ignored objects. *Q. J. Exp. Psychol. A* 37, 571–590.
- Tipper, S.P. (1991). Less attentional selectivity as a result of declining inhibition in older adults. *Bull Psychon Soc* 29, 45.
- Tisserand, R., Robert, T., Chabaud, P., Bonnefoy, M., & Chèze, L. (2016). Elderly Fallers Enhance Dynamic Stability Through Anticipatory Postural Adjustments during a Choice Stepping Reaction Time. *Front. Hum. Neurosci.* 10.
- Titz, C., & Verhaeghen, P. (2010). Aging and directed forgetting in episodic memory: A meta-analysis. *Psychol. Aging* 25, 405–411.
- Troyer, A., Leach, L., & Strauss, E. (2006). Aging and response inhibition: Normative data for the Victoria Stroop Test. *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 13, 20–35.
- Tsang, W.N., Lam, N.K.Y., Lau, K.N.L., Leung, H.C.H., Tsang, C.M.S., & Lu, X. (2013). The effects of aging on postural control and selective attention when stepping down while performing a concurrent auditory response task. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113, 3021–26.
- Tun, P.A., & Lachman, M.E. (2008). Age Differences in Reaction time and Attention in a National Telephone Sample of Adults: Education, Sex, and Task Complexity Matter. *Dev. Psychol.* 44, 1421–1429.

- U - V -

- Uemura, K., Oya, T., & Uchiyama, Y. (2013). Effects of speed and accuracy strategy on choice step execution in response to the flanker interference task. *Hum. Mov. Sci.* 32, 1393–03.
- Uemura, K., Haruta, M., & Uchiyama, Y. (2016). Age differences in reactive strategies and execution time during choice stepping with visual interference. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116, 1053–1062.

- Vallesi, A., Stuss, D.T., McIntosh, A.R., & Picton, T.W. (2009). Age-related differences in processing irrelevant information: evidence from event-related potentials. *Neuropsychologia* 47, 577–586.
- Vallesi, A., Hasher, L., & Stuss, D.T. (2010). Age-related differences in transfer costs: Evidence from go/nogo tasks. *Psychol. Aging* 25, 963–967.
- Van Zommeren, A.H., & Brouwer, W.H. (1994). Theories and concepts of attention. In A.H. Van Zomeren & W.H. Brouwer (Eds.), *Clinical Neuropsychology of Attention* (pp. 7-38). New York: Oxford university press.
- Vandervoort, A.A. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle Nerve* 25, 17–25.
- Vaughan, L., & Giovanello, K. (2010). Executive function in daily life: Age-related influences of executive processes on instrumental activities daily living. *Psychol. Aging* 25, 343–55.
- van Veen, V., & Carter, C.S. (2005). Separating semantic conflict and response conflict in the Stroop task: a functional MRI study. *NeuroImage* 27, 497–504.
- van Veen, V., Cohen, J.D., Botvinick, M.M., Stenger, V.A., & Carter, C.S. (2001). Anterior cingulate cortex, conflict monitoring, and levels of processing. *NeuroImage* 14, 1302–8.
- Vellas, B., Gillette-Guyonnet, S., Nourhashémi, F., Rolland, Y., Lauque, S., Ousset, P., Moulias, S., Andrieu, S., Fontan, B., Adoue, D., et al. (2000). [Falls, frailty and osteoporosis in the elderly: a public health problem]. *Rev. Med. Interne* 21, 608–613.
- Verdú, E., Ceballos, D., Vilches, J.J., & Navarro, X. (2000). Influence of aging on peripheral nerve function and regeneration. *J. Peripher. Nerv. Syst.* 5, 191–208.
- Verhaeghen, P., & De Meersman, L. (1998). Aging and the Stroop effect: a meta-analysis. *Psychol. Aging* 13, 120–126.
- Verschueren, S.M.P., Brumagne, S., Swinnen, S.P., & Cordo, P.J. (2002a). The effect of aging on dynamic position sense at the ankle. *Behav. Brain Res.* 136, 593–603.
- Verschueren, S.M.P., Swinnen, S.P., Desloovere, K., & Duysens, J. (2002b). Effects of tendon vibration on the spatiotemporal characteristics of human locomotion. *Exp. Brain Res.* 143, 231–239.
- Volkow, N.D., Logan, J., Fowler, J.S., Wang, G.J., Gur, R.C., Wong, C., Felder, C., Gatley, S.J., Ding, Y.S., Hitzemann, R., et al. (2000). Association between age-related decline in brain dopamine activity and impairment in frontal and cingulate metabolism. *Am. J. Psychiatry* 157, 75–80.
- Vuillerme, N., & Nougier, V. (2004). Attentional demand for regulating postural sway: the effect of expertise in gymnastics. *Brain Res. Bull.* 63, 161–165.
- Vuillerme, N., Forestier, N., & Nougier, V. (2002). Attentional demands and postural sway: the effect of the calf muscles fatigue. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1907–1912.
- W -
- Wang, J., Tian, J., Wang, R., & Benson, V. (2013). Increased attentional focus modulates eye movements in a mixed antisaccade task for younger and older adults. *PLoS One* 8, e61566.

- Watson, J.B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychol. Rev.* 20, 158–177.
- Watson, N.L., Rosano, C., Boudreau, R.M., Simonsick, E.M., Ferrucci, L., Sutton-Tyrrell, K., Hardy, S.E., Atkinson, H.H., Yaffe, K., Satterfield, S., et al. (2010). Executive function, memory, and gait speed decline in well-functioning older adults. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 65, 1093–1100.
- Welford, A.T. (1968). *Fundamentals of skill*. London: Methuen.
- Welford, A.T. (1980). Choice reaction time: Basic concepts. In A. T. Welford (Ed.), *Reaction Times* (pp. 73-128). New York: Academic press.
- West, R. (2000). In defense of the frontal lobe hypothesis of cognitive aging. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 6, 727–729.
- West, R. (2004). The effects of aging on controlled attention and conflict processing in the Stroop task. *J. Cogn. Neurosci.* 16, 103–113.
- West, R., & Alain, C. (2000). Age-related decline in inhibitory control contributes to the increased Stroop effect observed in older adults. *Psychophysiology* 37, 179–189.
- Whetstone, T., Cross, M.D., & Whetstone, L.M. (1996). Inhibition, contextual segregation, and subject strategies in list method directed forgetting. *Conscious. Cogn.* 5, 395–417.
- Whitaker, D., & Elliott, D.B. (1992). Simulating age-related optical changes in the human eye. *Doc. Ophthalmol. Adv. Ophthalmol.* 82, 307–316.
- Wierzbicka, M.M., Gilhodes, J.C., & Roll, J.P. (1998). Vibration-induced postural posteffects. *J. Neurophysiol.* 79, 143–150.
- Wild-Wall, N., Falkenstein, M., & Hohnsbein, J. (2008). Flanker interference in young and older participants as reflected in event-related potentials. *Brain Res.* 1211, 72–84.
- Winter, D.A., Patla, A.E., Frank, J.S., & Walt, S.E. (1990). Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly. *Phys. Ther.* 70, 340–347.
- Winter, D.A., Patla, A.E., Prince, F., Ishac, M., & Gielo-Perczak, K. (1998). Stiffness control of balance in quiet standing. *J. Neurophysiol.* 80, 1211–1221.
- Wiseman, E.J., & Souder, E. (1996). The older driver: a handy tool to assess competence behind the wheel. *Geriatrics* 51, 36–38, 41–42, 45.
- Wollesen, B., Voelcker-Rehage, C., Regenbrecht, T., & Mattes, K. (2016). Influence of a visual-verbal Stroop test on standing and walking performance of older adults. *Neuroscience* 318, 166–177.
- Woo, J., Ho, S.C., Lau, J., Chan, S.G., & Yuen, Y.K. (1995). Age-associated gait changes in the elderly: pathological or physiological? *Neuroepidemiology* 14, 65–71.
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture* 16, 1–14.

- Woollacott, M.H., & Tang, P.F. (1997). Balance control during walking in the older adult: research and its implications. *Phys. Ther.* 77, 646–660.
- Worden, T., Mendes, M., Singh, P., & Vallis, L. (2016). Measuring effects of a visual or auditory Stroop task on dual-task costs during obstacle crossing. *Gait Posture* 50, 159–63.
- Wu, K., Taki, Y., Sato, K., Qi, H., Kawashima, R., & Fukuda, H. (2013). A longitudinal study of structural brain network changes with normal aging. *Front. Hum. Neurosci.* 7, 113.
- Wundt, W. (1912). *An introduction to psychology*. New York: Read Books.

- Y - Z -

- Yamada, M., Higuchi, T., Tanaka, B., Nagai, K., Uemura, K., Aoyama, T., & Ichihashi, N. (2011). Measurements of stepping accuracy in a multitarget stepping task as a potential indicator of fall risk in elderly individuals. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 66, 994–1000.
- Yang, Y., Bender, A.R., & Raz, N. (2015). Age Related Differences in Reaction Time Components and Diffusion Properties of Normal-Appearing White Matter in Healthy Adults. *Neuropsychologia* 66, 246–258.
- Yeh, T.-T., Cinelli, M.E., Lyons, J.L., & Lee, T.D. (2015). Age-related changes in postural control to the demands of a precision task. *Hum. Mov. Sci.* 44, 134–142.
- Yogev, G., Giladi, N., Peretz, C., Springer, S., Simon, E.S., & Hausdorff, J.M. (2005). Dual tasking, gait rhythmicity, and Parkinson's disease: which aspects of gait are attention demanding? *Eur. J. Neurosci.* 22, 1248–1256.
- Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J.M., & Giladi, N. (2008). The role of executive function and attention in gait. *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.* 23, 329–342; quiz 472.
- Yogev-Seligmann, G., Rotem, Y., Mirelman, A., Dickstein, R., Giladi, N., & Hausdorff, J.M. (2010). How Does Explicit Prioritization Alter Walking During Dual-Task Performance? Effects of Age and Sex on Gait Speed and Variability. *Phys. Ther.* 90, 177–86.
- You, S.H. (2005). Joint position sense in elderly fallers: A preliminary investigation of the validity & reliability of the SENSERite measure. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 86, 346–52.
- Zacks, R.T., Radvansky, G., & Hasher, L. (1996). Studies of directed forgetting in older adults. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 22, 143–156.
- Zajac, I.T., & Nettelbeck, T. (2016). Auditory speed tasks as potential candidates for the study of cognitive ageing. *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol. Cogn.* 1–19.
- Zalewski, C.K. (2015). Aging of the Human Vestibular System. *Semin. Hear.* 36, 175–196.
- Zeef, E.J., Sonke, C.J., Kok, A., Buiten, M.M., & Kenemans, J.L. (1996). Perceptual factors affecting age-related differences in focused attention: performance and psychophysiological analyses. *Psychophysiology* 33, 555–565.

- Zellner, M., & Bäuml, K.-H. (2006). Inhibitory deficits in older adults: list-method directed forgetting revisited. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 32, 290–300.
- Zeynalzadeh Ghoochani, B., Hosseini, S.A., Talebian, S., Biglarian, A., Zeinalzadeh, A., Nazary, S., & Derakhshanrad, S.A. (2016). Healthy older adults balance pattern under dual task conditions: exploring the strategy and trend. *Health Promot. Perspect.* 6, 207–212.
- Zhang, H.H., Zhang, J., & Kornblum, S. (1999). A parallel distributed processing model of stimulus-stimulus and stimulus-response compatibility. *Cognit. Psychol.* 38, 386–432.
- van Zomeran, A.H., & Deelman, B.G. (1976). Differential effects of simple and choice reaction after closed head injury. *Clin. Neurol. Neurosurg.* 79, 81–90.

Thèse de Doctorat

Justine MAGNARD

Inhibition cognitive et fonction sensorimotrice : d'une mise à l'épreuve méthodologique à l'exploration des interactions liées au vieillissement

Cognitive inhibition and sensorimotor function: Methodological and theoretical considerations in young and older adults

Résumé

L'inhibition cognitive est caractérisée par de multiples processus spécifiques. Il est possible de distinguer une inhibition dite *perceptive* (IP), chargée de supprimer les stimuli non-pertinents, d'une inhibition dite *motrice* (IM), responsable de la suppression des réponses inadaptées à la tâche. Dans ce cadre, cette thèse a mis à l'épreuve deux questionnements centrés sur l'IP et l'IM, évaluées via les tâches de temps de réaction de choix de Nassauer & Halperin (2003).

Le premier questionnement (3 études / 200 sujets) testait la robustesse des résultats originaux soutenant la distinction théorique des processus d'IP et d'IM. Quelle que soit la complexité expérimentale testée (assis vs. debout, réponse manuelle vs. podale, avec vs. sans vibrations localisées), les résultats ont soutenu cette distinction IP vs. IM chez le jeune adulte.

Le second questionnement (3 études / 100 sujets) interrogeait le rôle suggéré de l'IP chez l'adulte âgé dans le processus d'intégration des informations proprioceptives nécessaires aux régulations posturales. Malgré de moindres performances inhibitrices en configuration posturale statique ou dynamique, les résultats n'ont pas attesté chez l'adulte âgé d'un contrôle inhibiteur spécifique de la perturbation proprioceptive imposée (i.e vibrations). L'interprétation de ces résultats s'articule autour des modifications avérées de la sensibilité proprioceptive avec l'âge et de la charge attentionnelle associée aux tâches testées. Cette thèse ouvre des perspectives théoriques et cliniques qui permettraient une meilleure appréhension de ces processus d'IP et d'IM, notamment en ce qui concerne l'effet de l'âge sur la distinction de ces capacités inhibitrices spécifiques.

Mots clés

Inhibition perceptive, Inhibition motrice, Fonction sensorimotrice, Proprioception, Vieillesse.

Abstract

Inhibition is a cognitive function characterized by specific inhibitory processes. It can be distinguished a so-called *perceptual* inhibition (PI), responsible for inhibiting of irrelevant stimuli, from a so-called *motor* inhibition (MI), in charge of the suppression of inappropriate motor responses. In this context, this thesis raised two major issues concerning the PI and MI processes, by using the reaction time conflict tasks designed by Nassauer & Halperin (2003).

Firstly, we tested the robustness of original results underlying the theoretical independence of PI and MI processes. Whatever the experimental complexity (seated vs. standing position, responses with hands vs. feet, with vs. without localized vibrations), the results (3 studies / 200 subjects) confirmed the independence of PI vs. MI processes in young adults.

Secondly, we examined in healthy older adults the possible role of PI in the integration process of proprioceptive inputs essential for efficient postural performance. The results (3 studies / 100 subjects) showed altered inhibitory performances while performing dynamic and static postural tasks in older adults. But no specific inhibitory control of the imposed proprioceptive perturbation (i.e., vibrations) was shown. The discussion is structured around issues of the age-related decline of proprioceptive sensitivity and the high attentional load associated with the tasks in older adults. Finally, this work opens theoretical and clinical perspectives which could allow for a better characterization of PI and MI processes, such as age-related discrimination of these specific inhibitory capacities.

Key Words

Perceptual inhibition, Motor inhibition, Sensorimotor function, Proprioception, Aging.