



HAL
open science

Etude de la préparation temporelle : apport des fonctions exécutives et du système nerveux autonome dans le contrôle moteur et cognitif de l'action

Souhir Ezzedini

► To cite this version:

Souhir Ezzedini. Etude de la préparation temporelle : apport des fonctions exécutives et du système nerveux autonome dans le contrôle moteur et cognitif de l'action. Neurosciences. Université de Nanterre - Paris X, 2022. Français. NNT : 2022PA100152 . tel-04123669

HAL Id: tel-04123669

<https://theses.hal.science/tel-04123669v1>

Submitted on 9 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Souhir Ezzedini

Étude de la préparation temporelle : apport des fonctions exécutives et du système nerveux autonome dans le contrôle moteur et cognitif de l'action

Thèse présentée et soutenue publiquement le 16/12/2022
en vue de l'obtention du doctorat de Sciences et techniques des activités
physiques et sportives de l'Université Paris Nanterre
sous la direction de P. Giovanni de Marco (Université Paris Nanterre)

Jury :

Rapporteur :	M. Alexandre Zenon	Chercheur-HDR, CNRS Université de Bordeaux
Rapporteur :	M. Alain Le Blanche	Professeur des universités–praticien hospitalier Université de Paris-Saclay
Examinatrice :	Mme. Sofia Ben-Jebara	Professeur, École Supérieure des Communications de Tunis
Examinatrice :	Mme. Malek Abidi	MCF, Université Paris Nanterre
Directeur de thèse	M. Giovanni de Marco	Professeur, Université Paris Nanterre

RÉSUMÉ

La capacité à allouer sélectivement des ressources attentionnelles dans le temps et à mettre en œuvre un contrôle moteur et cognitif est fondamentale dans la régulation proactive du comportement humain. Ce phénomène de contrôle actif est d'autant plus important qu'il implique une préparation temporelle qui doit être réalisée dans des conditions de pression temporelle et de prise de décision immédiate. L'attention peut être drivée par des mécanismes endogènes (top-down) contrôlés et volontaires et/ou par des mécanismes exogènes (bottom-up) automatiques et involontaires. Malgré, de nombreux travaux de recherche menés depuis plus d'un siècle dans le domaine de la psychologie et des neurosciences, afin d'appréhender les processus cognitifs et moteurs qui se produisent lors de la préparation temporelle, la question des mécanismes neurophysiologiques sous-jacents à la préparation temporelle ont été peu explorés. Le rationnel de la présente recherche est d'enrichir les hypothèses et les théories cognitivistes existantes sur les mécanismes de la préparation temporelle, en investiguant, dans le cas d'une tâche d'alerte et d'une tâche d'inhibition motrice, les effets de l'entraînement du contrôle attentionnel et l'influence du système nerveux autonome (SNA) sur la vitesse et la qualité des réponses produites par les sujets. Notre principal objectif est de montrer que l'effort que suscite une tâche de force, lors d'une tâche de préparation temporelle, influence le contrôle cognitif et les processus d'inhibition motrice, mis en évidence après entraînement du contrôle attentionnel et recueil d'indices du SNA. Cette hypothèse est mise en exergue dans une première étude où nous montrons qu'une demande accrue d'effort physique entraîne une baisse du contrôle exécutif attentionnel, notamment aux foreperiod (FP) les plus courtes (650 ms) de la tâche d'alerte; les ressources cognitives mobilisées, mesurées par le temps de réaction (TR), sont positivement et significativement corrélées à la composante sympathique basse fréquence (LF) de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) et négativement corrélées à la composante parasympathique haute fréquence (HF) de la VFC. En revanche, pour une FP plus longue (710 ms) et une demande diminuée de l'effort physique, nous observons une augmentation significative du contrôle cognitif se traduisant par une diminution du TR, et une contribution majeure du système parasympathique. Ce résultat est corroboré par la composante sympathique LF de la VFC ainsi que par la conductance cutanée qui étaient positivement corrélées avec le TR. Aussi, une analyse de régression linéaire a permis de montrer que l'index d'équilibre sympathovagal normalisé (LF/HF) permettait de prédire le comportement cognitif des sujets. Enfin, après avoir mis au point une méthode d'apprentissage machine, nous montrons que les sujets contrôlent significativement mieux leur vitesse et la précision de leurs

réponses lorsqu'ils s'entraînent mentalement à contrôler leur attention et à pratiquer un effort physique de force faible pendant une FP longue (710 ms). La deuxième étude porte sur le contrôle de l'inhibition motrice, mesurée pendant les phases diastoliques et systoliques cardiaques, mettant en évidence une relation statistique significative entre le contrôle de l'inhibition motrice, mesurée à partir d'un indice traduisant le maintien de l'inhibition (SSRT) et l'activité parasympathique du SNA, notamment après renforcement du contrôle exécutif attentionnel. Plus spécifiquement, au cours de l'inhibition, le TR était significativement diminué pendant la phase cardiaque diastolique comparée à la phase systolique, traduisant des capacités inhibitrices améliorées après entraînement mental. Ainsi, cette deuxième étude montre que la VFC, reliée aux fluctuations parasympathiques exercées par le nerf vague sur le nœud sinusal, permettait d'indexer la capacité des sujets à maintenir une inhibition motrice performante. En conclusion, ces deux études démontrent, pour la première fois, qu'une courte et intense séance d'entraînement mental du contrôle temporel de l'attention induisait un renforcement des fonctions exécutives permettant d'améliorer la performance cognitive et motrice d'une tâche de préparation temporelle d'une action.

Mots-clés : préparation temporelle, attention, inhibition, SNA, fonctions exécutives.

ABSTRACT

The ability to selectively allocate attentional resources in time and implement motor and cognitive control is fundamental in proactive regulation of human behavior. This phenomenon of active control is all the more important as it involves temporal preparation which must be realized under conditions of time pressure and immediate decision-making. Attention can be driven by controlled and voluntary endogenous mechanisms (top-down) and/or by automatic and involuntary exogenous mechanisms (bottom-up). However, despite many research carried out for more than a century in the field of psychology and neurosciences, to explain the cognitive and motor processes that occur during temporal preparation, the question of the underlying neurophysiological mechanisms of temporal preparation have been little studied. The main objective of this study is to enrich existing cognitive hypotheses and theories of temporal preparation mechanisms, by investigating the effects of attentional control training and the influence of the autonomic nervous system (ANS) on the speed and accuracy of responding in alertness and motor inhibition tasks. The second objective of this research is to show that effort triggered by the force levels during a temporal preparation task, influences cognitive control and motor inhibition processes, is demonstrated after executive attentional control training and collection of ANS indicators. This hypothesis is highlighted in the first study which showed that an increased demand of physical effort leads to a decrease in attentional control, especially at the short foreperiod (FP) (650 ms) of the alertness task; the mobilized cognitive resources, measured by reaction time (RT), were positively and significantly correlated with the sympathetic low frequency (LF) component of heart rate variability (HRV) and negatively correlated with the parasympathetic high frequency (HF) component of HRV. in contrast, at the longer FP (710 ms) with a reduced demand of physical effort, we observed a significant increase in cognitive control resulting in decreasing of RT, and a major contribution of the parasympathetic system. This result was corroborated by sympathetic LF component of HRV as well as by the skin conductance which were positively correlated with the RT. Also, a linear regression analysis showed that the normalized sympathovagal balance index (LF/HF) allow the prediction of cognitive behavior of the subjects. Finally, after having developed a machine learning method, we showed that subject control significantly the speed and accuracy of responding at long FPs (710 ms) and low physical effort. The results of the second study, which related to the control of motor inhibition, measured during the diastolic and systolic cardiac phases, highlight a significant statistical relationship between the control of motor inhibition, measured from an index of maintenance

of inhibition (SSRT) and parasympathetic activity of ANS after mental training of attentional control. Specifically, SSRT was significantly decreased during the diastolic cardiac phase compared to the systolic cardiac phase. Unlike systole, which duration was relatively constant, the duration of diastole varied with heart rate. Thus, this second study showed that HRV, being linked to the parasympathetic fluctuations exerted by the vagus nerve on the sinus node, indexed the ability of subjects to maintain their motor inhibition. In conclusion, these two studies demonstrate, for the first time, that a short and intense mental training session of the temporal control of attention induced a reinforcement of executive functions allowing to improve the cognitive and motor performance of a task.

Keywords: temporal preparation, attention, inhibition, ANS, executive functions

Remerciements

Je remercie vivement le Professeur Giovanni de Marco pour sa rigueur scientifique, son encadrement doctoral et son aide précieuse qui m'ont permis de m'épanouir et de progresser dans ce travail de thèse.

Je le remercie également de m'avoir formé à l'interdisciplinarité scientifique réunissant les domaines des neurosciences et de la psychologie cognitives, de la neurophysiologie et de la neuroimagerie. La réflexion scientifique qui a nourri ce travail de thèse a permis d'ouvrir une brèche dans un domaine encore peu exploré dans les sciences humaines et sociales qui concerne les interactions du système nerveux autonome (SNA) avec les fonctions exécutives du système nerveux central (SNC). Nous sommes conscients qu'il reste encore beaucoup de choses à découvrir dans l'étude de ces interactions et du rôle joué par le SNA dans le contrôle des fonctions cognitivo-motrices et perceptives que l'on pourrait étendre aux émotions. Nous espérons en tout cas que ce travail préliminaire contribuera à poser les premières briques d'une recherche qui devra être approfondie dans les années à venir afin d'éclairer l'ensemble des mécanismes sensori-moteurs qui concourent et s'intègrent à la préparation temporelle d'une action.

Je tiens également à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail de thèse, à tous ceux qui m'ont fait confiance et en particulier à mon mari qui m'a soutenu et encouragé pendant toutes ces années.

Enfin, je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de bien vouloir juger ce travail de thèse.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	6
Chapitre 1 : cadre théorique	10
sommaire	11
Partie 1 : Attention et fonctions exécutives.....	12
1.1 L’alerte en tant que composante de l’attention	12
1.2 La préparation temporelle : le rapport foreperiods (FPs) - temps de réaction (TR).	13
1.3 L’inhibition.....	14
1.4 L’entraînement mental : une tâche de contrôle attentionnelle avec une importante composante d’inhibition.....	14
1.5 Effort mental	15
Parti 2 : système nerveux autonome et fonctions cognitives	17
1.6 Généralité sur le SNA	17
1.6.1 Voies électriques du cœur	17
1.6.2 Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)	17
1.6.3 La réponse de conductance cutanée (SCR).....	19
1.7 Modèles neurophysiologiques : le lien entre la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) et l’attention.....	20
1.7.1.1 La théorie poly vagale.....	20
1.7.1.2 Le modèle d’intégration neuro-viscérale.....	21
Partie 3 : la relation entre le SNA et le cerveau d’un point de vue biologique.....	23
1.8 Rôle des noyaux	23
1.8.1 Le noyau vagal	23
1.8.2 Le locus cœruleus (LC)	23
1.8.3 noyaux raphé	24
1.9 neurotransmetteur.....	24
1.9.1 L’acétylcholine (Ach).....	25

1.9.2	La noradrénaline (NE).....	25
Chapitre 2 :		26
Étude de la préparation temporelle et SNA.....		26
1.10	Objectif de l'étude	27
1.11	Méthode.....	28
1.11.1	Participants	28
1.11.2	Paradigme expérimental	28
1.11.3	Mesures et analyses comportementales.....	30
1.11.3.1	Temps de réaction, force et anticipation	30
1.11.3.2	Le respect des niveaux de force : une technique d'apprentissage machine .	30
1.11.4	Mesures et analyses neurophysiologiques.....	31
1.11.4.1	Mesures et analyse de la réponse de conductance cutanée (SCR)	31
1.11.4.2	Mesures et analyse d'un électrocardiogramme (ECG)	32
1.11.5	Analyses statistiques	32
1.12	Résultats et discussion de la tâche d'alerte endogène	34
1.12.1	Résultats comportementaux	34
1.12.1.1	Temps de réaction	34
1.12.1.2	Anticipation.....	35
1.12.1.3	Respect de niveau de force.....	35
1.12.2	Indices du SNA	36
1.12.2.1	Corrélation entre la composante sympathique (LF et SCR) et parasymphatique (HF)et le TR dans le groupe avec EM	36
1.12.2.2	Équilibre sympathovagal.....	38
1.13	Discussion	39
1.14	résultats et discussion de la tâche d'alerte exogène	43
1.14.1	Résultats comportementaux	43
1.14.1.1.1	temps de réaction.....	43

1.14.1.1.2 Taux d'anticipation	43
1.14.2 Corrélation entre les anticipations et l'activité sympathique	43
1.15 Discussion	44
1.16 Conclusion.....	45
Chapitre 3 :	46
Étude de l'inhibition motrice	46
1.17 Objectifs de l'étude	47
1.18 méthode	48
1.18.1 participants	48
1.18.2 paradigme expérimental	48
1.18.3 mesure de temps de réaction stop signal (SSRT).....	50
1.18.4 analyse du signal ECG	51
1.18.5 Analyse de la SCR.....	52
1.18.6 Analyses statistiques	53
1.19 Résultats	53
1.19.1 Temps de réaction Stop signal (SSRT) en fonction des phases diastoliques et systoliques du rythme cardiaque.....	53
1.19.2 Résultats de la conductance cutanée (SCR).....	Erreur ! Signet non défini.
1.19.3 La moyenne quadratique des intervalles R-R successifs (RMSSD)	Erreur ! Signet non défini.
1.20 Discussion	55
1.21 Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Limites de l'étude	60
Perspectives.....	62
Références bibliographiques	64

LISTES DES FIGURES

Figure 1: représentation des liaisons des deux branches avec le cœur (Saboul, Pialoux et al. 2013).....	18
Figure 2: Le réseau central autonome.....	22
Figure 3 : représentation schématique de la disposition anatomique des neurones pré et post-ganglionnaires et des neurotransmetteurs des synapses des systèmes sympathiques et parasymphatiques.....	25
Figure 4. Tâche d'alerte endogène : les participants devaient répondre lorsqu'ils entendaient la cible go en serrant la poignée et en positionnant l'aiguille de la jauge sur la valeur numérique correspondant à 20 % (faible) ou 80 % (fort). Le bip du stimulus d'avertissement s'affichait pendant 50 ms et précédait le stimulus impératif (GO) avec des FPs variables ; alerte exogène : les participants devaient répondre lorsqu'ils entendaient GO en serrant la poignée .	29
Figure 5 : résultats de l'analyse de la variance [groupes x FPs x niveaux de force] dans la tâche endogène.....	35
Figure 6 : a) une corrélation entre la LF et la SCR (composante sympathique) et les TRs. b) une corrélation entre la HF (composante parasymphatique) et les TRs pendant la FP 650 et au niveau de force fort.	37
Figure 7 : a) une corrélation entre la LF et la SCR (composante sympathique) et les TRs. b) une corrélation entre la HF (composante parasymphatique) et les TRs pendant la FP 710 et niveau de force faible.	38
Figure 8 : Résultats de l'équilibre sympathovagal de la régression linéaire (LH/HF) et des TRs pendant la FP 710 et au niveau de force faible.	39
Figure 9 : Une corrélation entre la SCR (composante sympathique) et les anticipations. Une corrélation entre la HF (composante parasymphatique) et les anticipations pendant l'alerte exogène.....	44
Figure 10 : Présentation d'un essai stop signal. Le temps de réaction stop signal (SSRT) = temps de réaction go (tr) - le délai de stop signal (SSD).	51
Figure 11 : cycle cardiaque : la systole se produit autour de l'onde t, qui est généralement d'environ 300 ms après l'onde r. la diastole cardiaque se produit à 10 ms avant le pic de l'onde r (Rae, Botan et al. 2018).	51
Figure 12 : Intervalles RR successifs utilisés pour calculer le RMSSD.	52
Figure 13 : Résultats de temps de réaction stop signal (SSRT) [groups x cycles cardiaques] pendant la tâche stop signal.....	54
Figure 14 : une corrélation entre la SCR (composante sympathique) et le SSRT. b) une corrélation entre le RMSSD (composante parasymphatique) et le SSRT dans le groupe avec EM.	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : résultats du respect de niveau de force (%)..... 36

LISTE DES ABREVIATIONS

TR	Temp de réaction
SSRT	Temp de réaction stop signal
SSD	Délai stop signal
FP	Foreperiod
S1	Stimulus avertisseur
S2	Stimulus impératif
EM	Entraînement mental
Sans EM	Sans entraînement mental
SNA	Système nerveux autonome
VFC	Variabilité de fréquence cardiaque
LF	Basse fréquence
HF	Haute fréquence
LF/HF	Équilibre sympathovagal
RMSSD	Racine carrée des différences au carré des intervalles RR successifs
SCR	Réponse de conductance cutanée
ACH	Acétylcholine
NE	Noradrénaline

INTRODUCTION GENERALE

La préparation temporelle aide à optimiser les réponses motrices en réduisant l'incertitude sur les événements à venir et en augmentant la probabilité d'occurrence de la cible pour répondre au moment le plus propice à l'action (Salet, Kruijne et al. 2022 ; Vallesi and Shallice 2007). Depuis le début du siècle dernier, les chercheurs ont étudié la préparation temporelle en utilisant principalement des paradigmes composés de FPs fixes et variables (e.g Niemi Näätänen, 1981 ; Woodrow, 1914). Ces auteurs ont observé que les TRs étaient plus rapides lorsque le stimulus impératif (S2) était précédé d'un stimulus avertisseur (S1) ; ce résultat a conduit à postuler que le stimulus avertisseur suscitait un processus de préparation temporelle pendant l'intervalle de temps qui sépare S1 de S2. L'intervalle de temps entre l'indice et la cible est connu sous le nom FP et l'observation des réponses motrices à l'arrivée de la cible a donné naissance à l'étude de la préparation temporelle. Ainsi, le processus de préparation temporelle a été largement investigué en faisant varier le temps entre les foreperiods. La plupart des études ont montré plus particulièrement que la relation entre FP et TR était extrêmement sensible aux variations de distribution et de durées des FPs (e.g, Los et al., 2017 ; Trillenberg et al., 2000). Aussi, au fil des années, l'analyse de la fonction « TR - FP » a révélé que le comportement préparatoire était modulé par l'arousal tonique et phasique variant au travers différentes échelles de temps (Vallesi et Shallice., 2007).

Aussi, le phénomène de préparation temporelle a fait l'objet d'un développement de modèles successifs, e.g le modèle de conditionnement de trace de Los et Van den Heuvel (2001), le modèle à double processus de Vallesi et Shallice (2007), la théorie des traces multiples de Los, Kruijne et al. (2014). Chacun de ces modèles a montré ses avantages, inconvénients et limites. Ainsi, de nombreux chercheurs ont tenté d'expliquer les effets indépendants et les interactions qui se produisaient au cours du temps dans les intervalles FPs mais tous peinent à généraliser leur théorie car les processus cognitifs qui se produisent séquentiellement au cours du temps s'expriment sur des échelles de temps relativement larges. De fait, les chercheurs ne réussissent pas à capturer l'ensemble des informations produites pendant la tâche de préparation temporelle, chaque modèle ne prenant en compte seulement qu'une partie des informations (effets séquentiels, effets de distribution, effets de transfert, fonction de hasard, etc.).

Ainsi, puisque la plupart de ces travaux de recherche ne permettent pas d'appréhender de façon claire les mécanismes cognitifs et neurobiologiques qui se produisent lors de la préparation temporelle, nous proposons une nouvelle approche qui devrait permettre de compléter cette série de modèles, notamment en rapprochant les informations cognitives qui se manifestent

durant les FPs à des biomarqueurs neurophysiologiques qui proviennent du système nerveux autonome (SNA) susceptible de participer aux réponses motrices des sujets.

Nos travaux précédents (Daly et al., 2020) ont montré que l'entraînement mental du contrôle attentionnel permettait de déployer l'attention lors de la préparation temporelle et que les ressources cognitives mobilisées et le SNA étaient suspectés de jouer un rôle important dans ce déploiement. Nous proposons dans ce travail de thèse d'introduire un nouveau paradigme dans lequel les entrées sensorielles visuelles sont remplacées par des entrées auditives et un feedback visuel est ajouté permettant aux sujets de moduler et de contrôler leur réponse motrice en fonction du niveau de force exigé (faible moyen, fort) par la tâche. Contrairement aux paradigmes existants de préparation temporelle, nous avons utilisé des FPs de très courtes durées (< 1 seconde) et manipulé l'intensité de l'effort physique afin de sensibiliser notre tâche cognitive aux composantes sympathique et parasympathique du SNA. Ainsi, au cours de la préparation temporelle de la tâche d'alerte proposée dans ce travail de thèse seront manipulés principalement trois facteurs : la durée des FPs, l'intensité de l'effort mental physique et l'entraînement mental du contrôle attentionnel.

L'effort mental fait référence au niveau de force imposé par la tâche d'alerte. Notre hypothèse est que les ressources mobilisées lors de l'effort mental produit au cours de l'alerte devraient impacter les performances cognitives de la préparation temporelle (Sweller 1998 ; Parasuraman et al., 1987). L'un des mécanismes neurobiologiques sous-jacents qui devrait participer à l'effort mental de la tâche d'alerte correspond à l'activité du SNA.

Au cours de la dernière décennie, une attention accrue était portée sur la VFC. Porges et Raskin (1969) ont montré que la VFC diminuait significativement lors d'une attention soutenue. Sur la base d'autres preuves empiriques, Backs et Ryan (1992) ont manipulé la charge de la mémoire de travail et des intervalles temporels dans une tâche d'attention soutenue. Ils ont constaté que l'activité du tonus vagal diminuait lorsque la demande attentionnelle augmentait. De même, Middelton et al. (1999) ont observé une diminution de la VFC dans des tâches d'attention impliquant la mémoire de travail. D'autres études ont relié la réponse électrodermale de la conductance cutanée (SCR) à l'attention et à l'effort mental. Kahneman (1969) a montré que lors d'une tâche dans laquelle était manipulé l'effort mental, la réponse sympathique reflétée par la SCR était corrélée à la charge mentale imposée par la tâche. Récemment, le modèle d'intégration neuro-viscérale de Thayer & Lane (2000) démontre que la VFC, utilisée comme indicateur du tonus vagal, était associée à une régulation de l'attention et à un processus d'inhibition. Selon ses auteurs, l'activité du SNA déterminerait l'engagement de processus excitateurs (attention) et inhibiteurs (moteur).

L'intégration de l'activité du SNA dans l'inhibition motrice a fait l'objet de plusieurs recherches. Par exemple, Schumann, Köhler et al. (2019) ont montré qu'une VFC élevée reflétant le système parasympathique était associée à un niveau élevé de contrôle inhibiteur dans une tâche stop-signal. Également, Spruit, Wilderjans et al. (2018) et Kuipers, Richter et al. (2017) ont montré que l'engagement de processus inhibiteurs dans une tâche de Stroop (interférence cognitive) et une tâche de Flanker (attention sélective) ralentissait l'activité sympathique du SNA. Par ailleurs, Birren et al. (1963) et Jennings et Wood (1977) ont suggéré que les réponses motrices dans les tâches de temps de réaction simples pouvaient être influencées par les phases diastolique et systolique de l'activité cardiaque. De même, Craig (2009) a mentionné que les centres corticaux attentionnels avaient accès à l'état homéostatique interne et pouvaient déclencher des réponses régulatrices par le biais d'un ajustement autonome qui se traduisait par une diminution de la conductance cutanée lors de l'inhibition d'une réponse motrice. Néanmoins, le rapport entre le SNA et l'inhibition motrice a été peu étudié.

Objectifs du travail de thèse

Dans la première partie du travail de thèse, nous proposons d'étudier la préparation temporelle en utilisant une tâche d'alerte endogène de l'attention en manipulant l'intensité de l'effort physique (force) et la durée (foreperiod) de la préparation temporelle avec et sans entraînement mental (avec EM et sans EM). Plus précisément, nous avons manipulé les FPs correspondant aux intervalles de temps séparant l'indice (stimulus avertisseur) du stimulus impératif (cible) qui variaient de 650 ms (FP courte) à 710 ms (FP longue) et deux niveaux de force physique (faible et fort). Nous souhaitons montrer que la performance cognitive est un compromis à chercher entre la vitesse et la précision de la réponse attendue, dépendant des ressources cognitives mobilisées au cours de la tâche et pourrait être prédite par l'équilibre entre l'activité des voies sympathique et vagale du SNA.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous proposons d'étudier les mécanismes d'inhibition que produit la tâche d'entraînement mental sur les réponses motrices des sujets, en appliquant un modèle de cheval de course développé par Verbruggen et Logan (1997 ; 2008). Nous supposons que l'entraînement mental du contrôle attentionnel augmentera l'état d'arousal contrôlé par le SNA. (Critchley., 2001 ; Decety., 1996) Cette deuxième étude permettra de mettre en évidence que l'inhibition motrice est également contrôlée par le système nerveux autonome, notamment par les composantes sympathiques et parasympathiques du SNA.

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE

SOMMAIRE

Afin d'expliquer les mécanismes neurophysiologiques du SNA impliqués dans le contrôle attentionnel et l'inhibition, nous passons en revue les principaux concepts et conclusions méthodologiques dans les domaines des neurosciences, de la psychologie et de la physiologie.

Ainsi, dans la première partie de ce chapitre cadre théorique, nous expliquons le phénomène de la préparation temporelle à partir des travaux de recherche réalisés en psychologie en introduisant la notion de FPs, de l'effort mental et le rôle de l'alerte en tant que composante de l'attention. Nous décrivons aussi comment l'EM sollicite l'alerte et l'inhibition. Ensuite, nous soulignons que le SNA est un élément clé dans la présente recherche en décrivant son activité neurophysiologique et son lien avec l'attention. À la fin de ce chapitre, nous décrivons le lien entre le cerveau et le SNA d'un point de vue neurobiologique en introduisant les différentes structures et neurotransmetteurs impliqués dans l'interaction SNA-cerveau.

PARTIE 1 : ATTENTION ET FONCTIONS EXECUTIVES

1.1 L'ALERTE EN TANT QUE COMPOSANTE DE L'ATTENTION

James (1890), définit l'attention comme « 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 [...]. Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres ». Dès cette époque, les chercheurs notaient que l'attention nécessite la sélection des informations ou des événements extérieurs. Le processus de sélection est indispensable dans la vie quotidienne afin d'allouer les ressources attentionnelles et d'assurer à chaque instant un comportement efficace et adapté à la situation (Hillyard et Picton, 1979). Différents modèles attentionnels ont été proposés, mais on s'accorde actuellement sur l'existence d'un système attentionnel à trois composantes : l'alerte, le contrôle volontaire de l'attention et l'orientation (Posner et Petersen., 1990 ; Fan et al., 2002, 2003).

L'attention est connue pour intervenir dans les processus d'alerte, dans l'orientation spatiale vers des stimuli sensoriels, et le maintien d'un état de vigilance. L'attention peut-être expérimentalement évaluée en mesurant les temps de réaction en présence/absence d'un signal avertisseur (Sturm, De Simone et al. 1999). Suivant la présence ou l'absence d'un stimulus avertisseur, le système attentionnel sera divisé en deux types d'alertes : une alerte endogène et une alerte exogène.

L'alerte exogène entraîne un changement attentionnel rapide et involontaire en réponse à des événements externes (Posner., 2008) ; elle fait référence à un stimulus extérieur saillant traité par un mécanisme cognitif ascendant.

L'alerte endogène est définie comme un contrôle interne et volontaire de l'état de vigilance en l'absence de signaux externes ; elle représente la capacité à préparer une réponse motrice pendant une courte période de temps après l'apparition d'un signal avertisseur (préparation

temporelle) (Posner., 1978) en se référant à une initiation des mécanismes par un traitement cognitif descendant.

Pour comprendre les mécanismes de l'attention temporelle, il est communément admis que ces deux tâches doivent être examinées séparément (Lawrence and Klein., 2013).

1.2 LA PREPARATION TEMPORELLE : LE RAPPORT FOREPERIODS (FPS) - TEMPS DE REACTION (TR)

La relation entre FP et TR a été largement étudiée avec une variété de délais et de distributions de FPS. Le principal intérêt des travaux de recherche sur l'attention temporelle était de comprendre comment l'intervalle FP modifie le TR sur des échelles de temps différentes : (a) entre les essais précédents et les essais en cours (effets séquentiels) ; (b) entre les essais au sein d'un même bloc expérimental (effets de distribution) et (c) au travers de blocs expérimentaux d'essais (effets de transfert).

Modèle de conditionnement de traces Los et Van den Heuvel (2001)

Selon le modèle de conditionnement de trace, Los et Van den Heuvel., (2001) ont montré que la préparation temporelle est le résultat d'un effet séquentiel, qui correspond à l'interaction entre la durée de la FP en cours et la durée de la FP précédente ; chaque moment critique au cours de la préparation temporelle serait associé à une force conditionnée, développée au cours des essais précédents et cette force conditionnée serait perçue comme une trace mnésique.

Modèle à double processus de Vallesi et Shallice (2007)

Le modèle à double processus considère que les durées des FPS précédentes influenceraient les effets FP en cours. Si les FPS apparaissent aléatoirement, avec une même probabilité, des TR plus courts seront observés avec les FPS les plus longues. Une fonction de hasard caractérise ce processus mais elle ne fournit pas de description des effets de distribution des FPS ; cette fonction n'explique pas ce que produisent les effets FP précédents sur les effets FP en cours. Son autre inconvénient est qu'elle ne parvient pas à expliquer les mécanismes cognitifs neurobiologique sous-jacents à la préparation temporelle.

La théorie des traces multiples Los, Kruijne et al. (2014)

En bref, cette théorie confirme les effets FPs avec une signature particulière, les effets séquentiels des FPs sont développés lors d'un mécanisme d'apprentissage implicite sollicitant l'inhibition pour prévenir toute réponse motrice prématurée.

1.3 L'INHIBITION

En psychologie, l'inhibition est définie comme l'implication d'un processus actif et volontaire sous-jacent au contrôle cognitif. On distingue une inhibition cognitive qui correspond à une suppression de contenus ou de processus cognitifs par exemple la résistance à l'interférence de processus capturant potentiellement l'attention et l'inhibition motrice qui empêche le système moteur d'être déclenché de manière inappropriée Harnishfeger (1995).

Selon Raymond et al., (1992) lorsque les individus dirigent leur attention vers un stimulus pertinent, cela réduit leur capacité à allouer des ressources à des stimuli pertinents ultérieurs. De ce point de vue, l'inhibition de la réponse motrice est la capacité à répondre de manière appropriée et supprime toute réponse automatique rapide ; cette capacité est essentielle dans un mécanisme cognitif endogène (Tian et al., 2014).

1.4 L'ENTRAÎNEMENT MENTAL : UNE TACHE DE CONTROLE ATTENTIONNELLE AVEC UNE IMPORTANTE COMPOSANTE D'INHIBITION

L'entraînement mental entraîne un état dynamique d'imagerie motrice durant lequel le sujet simule mentalement une action en utilisant sa mémoire de travail sans aucune sortie motrice. Cette technique appartiendrait à une catégorie qui activerait des processus de programmation et de préparation d'une action (Decety 1996). Il s'agit d'un état mental dans lequel la reproduction interne d'un acte moteur donné est répétée de manière extensive avec l'intention d'apprendre une nouvelle capacité ou améliorer une compétence connue. En effet, selon Jeannerod (1994,1995) l'imagerie motrice représente le résultat d'un mouvement conscient et intentionné, elle stimule les fonctions exécutives y compris la mémoire de travail et l'inhibition motrice.

En général, les mouvements imaginés ou exécutés sont soumis à des lois communes (Jackson, Lafleur et al., 2001). Ils partagent un principe fonctionnel mental et neuronal similaire. Lorsqu'un sujet visualise mentalement l'exécution d'un mouvement, des signaux sont envoyés aux muscles cibles, les mêmes voies neuromotrices qui sont impliquées dans l'exécution d'un mouvement sont également activées pendant la pratique mentale ; cette activation améliore les schémas de coordination appropriés et renforce la voie motrice (Jackson, Lafleur et al., 2001). De plus, Decety (1996) avait montré une congruence temporelle entre les mouvements imaginés et exécutés, qu'ils soient exécutés physiquement ou mentalement, ces mouvements engagent les mêmes processus cognitifs.

1.5 EFFORT MENTAL

Kahneman (1973) postule que la réalisation de toute activité attentionnelle nécessite un effort. L'effort mental investi dans une tâche dépend des exigences intrinsèques de la tâche et du contrôle volontaire que l'on peut produire au fil du temps. Ainsi, l'augmentation de l'écart entre les exigences des tâches et les ressources attentionnelles, pourrait probablement entraîner une détérioration des performances. Il doit y avoir une distinction entre l'effort momentané et la quantité totale d'effort nécessaire pour accomplir une tâche donnée. Nous supposons que l'attention ou l'effort momentané est contrôlée par la concentration et l'état de l'arousal.

L'effort mental est davantage lié aux aspects intensifs de l'attention et plus particulièrement à l'arousal autonome ; il est largement contrôlé par les propriétés des stimuli auxquels l'organisme est exposé. Lorsqu'une personne est engagée dans une tâche cognitive, l'arousal autonome et l'effort mental varient suivant les exigences imposées par la tâche Kahneman (1973) .

De plus, l'augmentation de l'effort mental pourrait entraîner une interférence avec la mémoire de travail. La théorie de la charge cognitive considère qu'une charge simultanée de la mémoire de travail réduit les ressources attentionnelles disponibles. (Gil-Gómez de Liaño, Stablum, & Umilta, 2016 ; Lavie, Hirst, de Fockert, & Viding, 2004). La plupart des théories qui ont suivi les travaux de Baddeley et Hitch (1974) ont suggéré que la mémoire de travail est un système à capacité limitée, les performances diminuent lorsque la charge de la mémoire simultanée augmente, et toute augmentation de la difficulté de traitement entraîne une perte d'informations

de la mémoire de stockage à court terme (Anderson, Reder, & Lebiere, 1996 ; Case, Kurland, & Goldberg, 1982 ; Conway & Engle, 1994; Daneman & Carpenter, 1980).

Dans une phase de préparation temporelle, la mémoire de travail reçoit une activation, mais dès que la sollicitation des ressources attentionnelles augmente, cette activation sera limitée. En conséquence, les traces mnésiques des éléments à conserver s'estompent lorsque l'attention est occupée par un traitement (Cowan, 1995, 1999 ; Towse & Hitch, 1995).

PARTI 2 : SYSTEME NERVEUX AUTONOME ET FONCTIONS COGNITIVES

1.6 GENERALITE SUR LE SNA

1.6.1 VOIES ELECTRIQUES DU CŒUR

Le cœur possède des cellules pacemaker spécialisées qui démarrent la séquence électrique de dépolarisation et de repolarisation cardiaque. Cette propriété du tissu cardiaque est appelée rythmicité ou automaticité inhérente. Le signal électrique est généré au niveau du nœud sino-auriculaire (nœud SA) et se propage à l'ensemble du tissu cardiaque via des voies conductrices particulières : les voies internodales et les fibres auriculaires, le nœud auriculo-ventriculaire (nœud AV), le faisceau de His, les branches droite et gauche du faisceau et fibres de Purkinje.

1.6.2 VARIABILITE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE (VFC)

Le SNA est formé de nerfs se connectant au système nerveux central (SNC) par le biais d'organes internes (e.g. le cœur), il régule les fonctions automatiques comme la fréquence cardiaque et respiratoire, il joue un rôle vital dans l'attention et l'autorégulation pour moduler la réponse physiologique de l'arousal et répondre aux exigences environnementales (Thayer and Lane 2000). Le SNA est divisé en deux parties : le système nerveux sympathique (SNS) et le système nerveux parasympathique (SNP).

La VFC est la variation de l'intervalle entre les battements du cœur (RR) peut être mesurée par un électrocardiogramme (ECG). La modulation phasique de la fréquence cardiaque (FC) provient des deux voies du SNA, le SNP et le SNS (Kumral, Schaare et al. 2019) (figure 1).

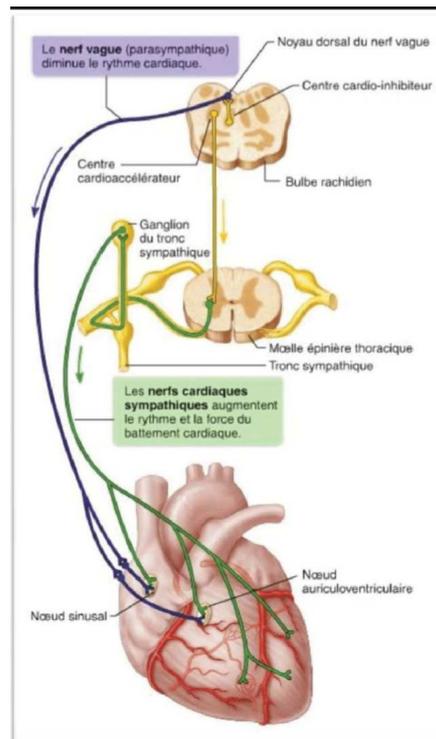


Figure 1:représentation des liaisons des deux branches avec le cœur (Saboul, Pialoux et al. 2013)

Le SNA joue un rôle de régulation, le SNP réduit rapidement les battements du cœur alors que le SNS les augmente lentement. (Kumral, Schaare et al. 2019)

Il existe une interaction permanente entre les fonctions cardiaques et respiratoires. Ainsi, l'inspiration produit une accélération du rythme cardiaque alors que l'expiration produit un ralentissement de l'activité cardiaque. Donc le rythme cardiaque au repos n'est pas régulier dans le temps. Les battements de cœur successifs varient en fonction des mouvements respiratoires dans un processus qui s'appelle arythmie des sinus (O'Hanlon 1972). L'arythmie respiratoire des sinus est utilisée pour explorer la connexion entre la respiration et les modifications de la fréquence cardiaque. Les variations de la fréquence cardiaque pouvaient être directement corrélées au tonus vagal qui fait référence à l'activité parasympathique (nerf vague), de ce fait, l'arythmie respiratoire est un indice du contrôle cardiaque parasympathique (Grossman, Stemmler et al. 1990).

La VFC est étroitement liée et dépendante de la fréquence respiratoire de l'individu au cours de l'enregistrement (Saboul, Pialoux et al. 2013). Comme l'illustre la Figure 3 ; le sujet présente, à partir d'une analyse spectrale (par transformée de Fourier) de la variabilité du rythme cardiaque, deux types de fréquences qui varient entre les très basses les basses fréquences (BF) et les hautes fréquences (HF). Ainsi, une moindre variation du cycle

respiratoire entraîne un pic d'énergie dans l'une ou l'autre de ces bandes de fréquences (BF ou HF). La HF couvre approximativement une bande de fréquence qui s'étale de 0,15 à 0,4 Hz ; elle est attribuée à la modulation de la fréquence cardiaque contrôlée par la respiration (branche efférente du nerf vague), elle reflète principalement la sortie du système nerveux parasympathique respiratoire vers le cœur. Lorsque l'amplitude respiratoire augmente, la puissance de cette bande de fréquences augmente. Elle serait représentative de l'arythmie sinusale respiratoire. La basse fréquence (LF) du VFC, généralement s'étale de 0,05 à 0,15 Hz ; elle refléterait l'activité du barorécepteur et serait un mélange de l'activité sympathique et parasympathique (Chang, Metzger et al. 2013).

Enfin, le rapport LF/HF représenterait un index de quantification de l'équilibre sympathovagal. Nous retiendrons que l'équilibre sympathovagal peut être modulé par plusieurs facteurs comme l'arousal (Bernardi, Salvucci et al. 1990 ; Elghozi and Julien 2007).

1.6.3 LA REPONSE DE CONDUCTANCE CUTANEE (SCR)

La SCR est un terme général utilisé pour décrire les fluctuations de l'activité électrique de la peau résultant des fonctions du système nerveux sympathique (Dawson, Schell et al. 2017). Ces fluctuations sont causées par l'activation des glandes sudoripares qui sont contrôlées par le système nerveux sympathique, qui régule de manière autonome la mobilisation du corps humain pour l'action et elle n'est pas influencée par l'activation parasympathique.

La SCR peut être considérée comme un indicateur à la fois de l'excitation psychologique et physiologique et, par extension, comme un indicateur de la performance l'activité (Dawson, Schell et al. 2017. Boucsein., 2012).

Remment Azzalini, Rebollo et al. (2019) ont mis en relief l'idée que le cerveau reçoit des stimuli de l'intérieur du corps, le cœur génère sa propre activité électrique et envoie d'une manière continue des informations au cerveau. L'activité cardiaque influence le traitement attentionnel de l'information sensorielle. Biologiquement, la VFC fournit des informations sur l'état du SNC.

1.7 MODELES NEUROPHYSIOLOGIQUES : LE LIEN ENTRE LA VARIABILITE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE (VFC) ET L'ATTENTION

La relation entre la VFC et l'attention a été peu explorée. Cependant, Lacey (1967) a suggéré une correspondance entre la diminution de la variabilité cardiaque et la stabilisation attentionnelle durant une observation attentive de l'environnement et depuis, il pense que le changement de l'activité du SNA modifie l'aspect sensoriel de l'organisme ce qui explique les travaux de recherches ultérieures sur la décélération cardiaque et la performance sensorimotrice (e. g temps de réaction) et sur la question de l'effort mental et la variabilité cardiaque (e. g Kalsbeek and Sykes., 1967 ; Kahneman., 1973).

Récemment, Deux théories affirment le lien causal entre l'activité du SNA représentée par la VFC et le contrôle attentionnel : la théorie polyvagale de Porges (1994) et le modèle de l'intégration neuro-viscérale de Thayer (2009).

LA THEORIE POLY VAGALE

La théorie polyvagale de Porges (1994) est un modèle explicatif qui soutient le lien entre le SNA et l'attention. Selon Porges la neuroception régule l'activité du SNA, il postule que ce dernier a évolué en trois étapes et joue un rôle primordial et spécifique dans les processus d'engagement social. Chaque étape représente une structure. La première structure acquise est la portion non myélinisée du nerf vague (dorsal), se caractérise par une réponse lente et responsable sur la diminution de la fréquence cardiaque en inhibant l'activité sinusale. La capacité à développer une réponse dite fight or flight et liée à l'acquisition du SNS (le système nerveux orthosympathique) qui représente la deuxième structure de l'évolution du SNA et elle responsable sur l'accélération de la fréquence cardiaque. La troisième structure est la portion myélinisée du nerf vague (ventral), il se caractérise par sa réponse rapide et permet l'engagement ou le désengagement social.

Porges (1992) a prédit et montré qu'une activité vagale cardiaque élevée indiquait une bonne capacité attentionnelle chez les enfants.

In addition, Porges et Raskin (1969) ont montré que la VFC a significativement diminué lors d'une attention soutenue.

LE MODÈLE D'INTEGRATION NEURO-VISCÉRALE

Thayer, Sollers III et al. (2009) ont développé le modèle d'intégration neuro-viscérale pour expliquer les liens fonctionnels entre les structures du SNA et du SNC. Ils considèrent que la VFC est associée à l'activité de plusieurs régions cérébrales (cortex préfrontal, cortex cingulaire, insula, amygdale) impliquées dans l'attention, la mémoire et l'inhibition. Aussi, une diminution de la VFC est associée à une diminution de la performance cognitive. Alors qu'une haute VFC est associée à de meilleures performances cognitives (Forte., Favieri, & Casagrande., 2019). Ainsi, l'activité vagale peut servir à indexer la capacité fonctionnelle des structures cérébrales et l'efficacité et l'efficience des fonctions exécutives, y compris la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur.

Dans cette organisation complexe du réseau central autonome, Le SNA est généralement conçu pour avoir deux branches principales - le système sympathique, associé à la mobilisation de l'énergie, et le système parasympathique, associé aux fonctions végétatives et réparatrices. Normalement, l'activité de ces branches est en équilibre dynamique. Lorsque cela se transforme en déséquilibre statique, par exemple sous des pressions environnementales, l'organisme devient vulnérable à la pathologie.

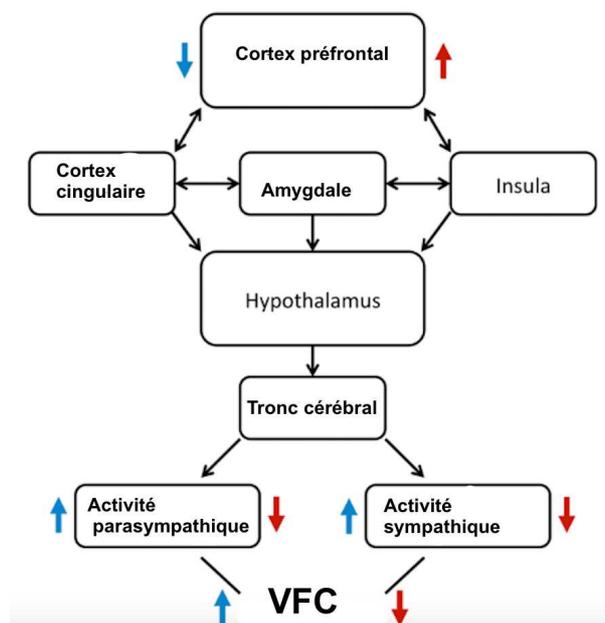


Figure 2: Le réseau central autonome

1.8 AROUSAL AUTONOME

Le SNA est associé à des niveaux variables d'activation physiologique ou arousal autonome. Les deux sous-systèmes (Sympathique et parasympathique) interagissent de manière antagoniste, afin de générer des niveaux variables d'activation d'arousal du SNA. Au cours d'une situation de pression temporelle ou d'effort mental et physique, l'activité sympathique devient prépondérante, produisant un *arousal autonome (sympathique)* permettant de s'adapter à la situation. Une augmentation de la SCR ou de la fréquence cardiaque est caractéristique de

ce niveau d'activation. Au contraire, lorsque le sujet se sent en état de relaxation physiologique, c'est l'activité parasympathique qui devient prépondérante, maintenant un niveau d'*arousal autonome* bas et entraînant une diminution de la SCR et de la fréquence cardiaque (Servant et al., 2008). Ainsi, il semble que la transition facile entre un haut niveau et un bas niveau d'*arousal* est dépendante de la capacité du SNA à modifier rapidement la SCR et fréquence cardiaque (Appelhans et Luecken., 2006).

La régulation autonome dépend principalement de la capacité du sujet à ajuster son niveau d'activation physiologique en fonction de l'environnement. Une activité flexible du SNA entraînera une réduction rapide ou une activation de l'état d'*arousal autonome* en fonction de la situation. Au contraire, une activité rigide du SNA permettra une moins bonne capacité d'adaptation physiologique selon les modifications de l'environnement (Servant et al., 2008).

PARTIE 3 : LA RELATION ENTRE LE SNA ET LE CERVEAU D'UN POINT DE VUE BIOLOGIQUE

1.9 ROLE DES NOYAUX

1.9.1 LE NOYAU VAGAL

Le noyau vagal est constitué de quatre noyaux situés dans la moelle allongée (la partie inférieure du tronc cérébral) : le noyau moteur dorsal du nerf vague (un nerf crânien), le noyau ambigu, le noyau solitaire, noyau spinal du nerf trijumeau (une entrée mineure du nerf vague). Le noyau solitaire reçoit l'entrée sensorielle du barorécepteur, tandis que le noyau ambigu et le noyau moteur dorsal sont impliqués dans la sortie parasympathique. Le noyau ambigu contient des neurones efférents vagues qui inhibent la fréquence cardiaque. Lorsque la fréquence cardiaque augmente, les afférences baroréceptrices sont activées et se terminent dans le noyau du faisceau solitaire dans la moelle. Le noyau dorsal du nerf vague prend naissance en avant de la base du quatrième ventricule dans la moelle. Le noyau moteur dorsal du nerf crânien a des fibres efférentes viscérales générales qui envoient des signaux parasympathiques au cœur et aux poumons (Baker and Lui 2021).

Le noyau bilatéral dans le tronc cérébral s'appelle le locus cœruleus.

1.9.2 LE LOCUS CŒRULEUS (LC)

Le locus coeruleus (LC), est le principal noyau noradrénergique du cerveau, est un noyau majeur impliqué dans les voies neuronales contrôlant la vigilance et la fonction autonome, il exerce une influence excitatrice sur les neurones favorisant l'éveil tels que les neurones cholinergiques (Samuels and Szabadi 2008). De manière impressionnante, la modulation de la vigilance dans le cerveau est en grande partie régulée par le LC, il libère le neurotransmetteur noradrénaline dans de nombreuses régions du cerveau et il est impliqué dans la modulation de nombreux comportements, y compris l'attention, la mémoire pendant les tâches cognitives, et la réponse au stress (Berridge and Waterhouse 2003). En tant que noyau autonome pré moteur majeur, le LC envoie des projections directes aux neurones pré ganglionnaires sympathiques de la moelle épinière (Nygren., 1977 ; Jones BE, Yang., 1985 ; Westlund et al., 1983) et aux neurones pré ganglionnaires parasympathiques du tronc cérébral et de la moelle épinière (Loewy et al., 1973 ; Breen et al., 1983).

En général, le LC augmente l'activité sympathique via l'activation des récepteurs $\alpha 1$ -adrénergiques sur les neurones sympathiques pré ganglionnaires (Samuels and Szabadi 2008) et réduit l'activité parasympathique via l'activation des récepteurs $\alpha 2$ -adrénergiques sur les neurones parasympathiques pré ganglionnaires (Yaici, Rampin et al. 2002) (Unnerstall, Kopajtic et al. 1984).

L'activation du LC entraîne un schéma bien défini de changements autonomes : une innervation principalement sympathique (e.g les glandes sudoripares) et une innervation principalement parasympathique (e.g la fréquence cardiaque).

1.9.3 NOYAUX RAPHE

Les noyaux raphé (le noyau raphé magnus, le noyau obscurus et le noyau pallidus) sont des structures sous-corticales du tronc cérébral, ils sont innervés par des projections noradrénergiques du LC via l'activation des récepteurs $\alpha 1$ -adrénergiques, ils sont impliqués dans la modulation de la fonction sympathique via des sorties sérotoninergiques vers la moelle épinière. Le LC se projette sur les motoneurones du tronc cérébral et de la moelle épinière, et facilite leurs activités via la stimulation des récepteurs $\alpha 1$ -adrénergiques (Van Bockstaele, Pieribone et al. 1989).

1.10 NEUROTRANSMETTEUR

1.10.1 L'ACÉTYLCHOLINE (ACH)

L'action de l'ACH en tant que neurotransmetteur était confirmée pour la première fois par la démonstration de Loewi selon laquelle la stimulation du nerf vague libérait une substance qui diminuait le rythme des battements lorsqu'elle était appliquée à un cœur isolé (Loewi 1921).

L'ACH est le principal neurotransmetteur synthétisé par les neurones cholinergiques niveau des ganglions périphériques et de médiateur des actions parasympathiques du système nerveux autonome (Fisher and Wonnacott 2012). Les neurones cholinergiques sont largement distribués dans le cerveau et il était montré que la signalisation cholinergique module de nombreuses fonctions cognitives telles que l'apprentissage, la mémoire, l'attention et les capacités de réflexion (Azevedo 2009).

1.10.2 LA NORADRENALINE (NE)

La noradrénaline (NE) (Norepinephrine) est le principal neurotransmetteur qui est synthétisé par les neurones LC, il a un rôle neuroprotecteur, joue un rôle dans les fonctions cognitives (Azevedo 2009). Le système sympathique prend naissance dans les centres bulbaires d'où partent des fibres pré-ganglionnaires qui sortent du tronc cérébral et de la moelle épinière, aboutissent aux ganglions para et pre-vertébraux de chaque côté de la moelle épinière. Des ganglions partent des fibres post-ganglionnaires sympathiques qui libèrent de la noradrénaline (norepinephrine en anglais) qui va stimuler deux types de récepteurs, les récepteurs alpha et beta-adrénergiques (Lewis and Coote 1990).

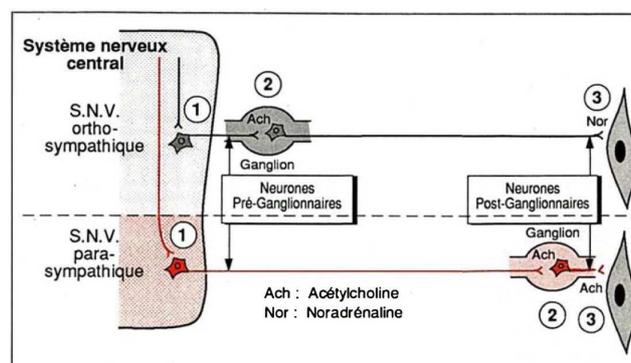


Figure 3 : représentation schématique de la disposition anatomique des neurones pré et post-ganglionnaires et des neurotransmetteurs des synapses des systèmes sympathiques et parasympathiques.

**CHAPITRE 2 : ÉTUDE DE LA PREPARATION TEMPORELLE ET
SNA**

1.11 OBJECTIF DE L'ETUDE

Selon Lawrence et Klein (2013), les tâches de préparation purement endogène favorisent la rapidité et la précision des réponses (TR). Pour confirmer cette suggestion, McCormick et ses collègues (2019) ont reproduit les conditions expérimentales de Lawrence et Klein (2013) mais ils n'ont pas observé les performances attendues dans les conditions endogènes qui correspondaient à une diminution des TRs et du taux d'erreur. McCormick et ses collègues (2019) suggèrent que le compromis vitesse-précision des réponses lors d'une tâche de vigilance endogène devrait être exploré dans diverses conditions méthodologiques pour expliquer comment le signal (indice) dans la condition endogène influencerait la charge cognitive.

La question de l'effort mental et physique que nous manipulons dans notre expérience est pertinente car elle fait appel à la charge mentale et à la mémoire de travail qui peut être affectée par ce type d'activité. Ainsi, un effort mental élevé pourrait affecter les performances cognitives (Sweller 1998 ; Parasuraman et al., 1987). De plus, l'effort mental est davantage lié à l'état d'éveil physiologique géré par l'activité du SNA (Kahneman 1973).

Ainsi, le SNA est considéré comme un des mécanismes sous-jacents qui pourrait expliquer la performance cognitive (e.g Porges et Raskin., 1969., Porges, 1974 ; Baks et Ryan., 1992 ; Kahneman., 1969 Hansen et al., 2003 ; Thayer et al., 2009). Aussi, le lien entre le cerveau et le cœur était énoncé depuis des décennies indiquant que l'interaction se fait via le nerf vague. Le nerf vague libérait l'acétylcholine pour influencer l'activité parasympathique sur la fréquence cardiaque (Noma A, Trautwein., 1978 ; Osterrieder, Noma et Trautwein., 1980 ; Akmann, Noma and Trautwein., 1983). Alors que, la libération de la noradrénaline permettait l'activation des récepteurs β -adrénergiques augmentant l'influence sympathique sur la fréquence cardiaque (DiFrancesco et al., 1986). Ces neurotransmetteurs sont largement distribués dans le système nerveux central et connues par leur rôle dans l'attention.

Sur la base de ces suggestions théoriques, nous proposons d'étudier l'hypothèse de la préparation temporelle de l'alerte endogène et exogène à partir des mécanismes du SNA. Dans l'alerte endogène, nous étudions l'influence des composantes du SNA sur les réponses (TR). Nous avons manipulé les variables de temps, d'effort mental et physique en manipulant respectivement les durées des FP (court, long) et les niveaux de force (faible, fort). Ainsi, nous supposons que l'entraînement mental attentionnel (EM) augmentera l'arousal autonome

contrôlé par le SNA (Critchley., 2000 ; Decety., 1996) en renforçant les voies sympathiques et parasympathiques. Dans l'alerte exogène, nous proposons une tâche de temps réaction où le sujet répondra au stimulus impératif (pas la préparation temporelle). Nous suggérons que l'EM renforcera l'aspect automatique du système bottom up favorisant l'anticipation.

1.12 METHODE

1.12.1 PARTICIPANTS

Quarante participants (19 femmes et 21 hommes) âgés de 20 à 35 ans (moyenne = 26.92; écart type (SD) = 4.14), sans troubles psychiatriques, neurologiques ou sensorimoteurs. Tous les participants étaient droitiers. Dans cette étude, nous comparons deux groupes : un groupe avec entraînement mental (EM) qui s'est entraîné mentalement avant la tâche physique réelle (n=20) et un groupe qui a réalisé la tâche réelle sans entraînement mental (sans EM) (n=20).

1.12.2 PARADIGME EXPERIMENTAL

Au début, les participants étaient confortablement assis sur une chaise, ils ont effectué 3 essais de force atteignant la force volontaire maximale (FMV) en serrant la poignée pendant 2 secondes (s) ; la consigne donnée « serrez la poignée le plus fort possible et relâchez la pression au moment indiqué par l'expérimentateur », chaque essai était suivi de 30 s de repos. La FMV était déterminée en calculant la moyenne des trois essais consécutifs. La FMV a permis de normaliser les niveaux de force de chaque participant à 20 % (niveau faible) et 80 % (niveau fort), la FMV était converti en une valeur numérique sur une jauge, nous avons demandé aux participants de retenir deux valeurs numériques qui correspondent aux 20% et 80 %. Le but de l'utilisation de deux niveaux de force opposés était de moduler l'effort physique en faisant varier l'arousal autonome.

La tâche expérimentale est constituée de 8 blocs de deux tâches alertes. Une alerte endogène et une alerte exogène.

Étude de la préparation temporelle

Dans la tâche endogène, nous avons manipulé deux niveaux de force opposés (faible et fort) ; avec trois FPs (650, 680 et 710 ms) ; Les FPs et les niveaux de force étaient randomisés. L'intervalle FP sépare un stimulus l'indice (avertisseur) (bip) d'un stimulus impératif (GO) et prépare temporairement les participants à répondre en serrant la poignée aussi rapidement et aussi précisément que possible (Posner, 1973 ; Lawrence et Klein, 2013).

Au début de chaque bloc, une instruction auditive était générée pour préciser le niveau de force requis dans une série de 7 essais consécutifs où seuls les FPs variaient. Les participants devaient se préparer mentalement quand ils entendraient le bip (stimulus avertisseur) et répondre au GO (stimulus impératif), ils devaient atteindre les valeurs de niveau de force sur la jauge projetée sur l'écran. Le retour visuel (jauge) permet de produire un niveau de force approprié et de contrôler les réponses motrices attendues des sujets.

La tâche d'alerte exogène est une tâche de contrôle, nous ne manipulons pas la préparation temporelle. Le participant doit répondre au stimulus impératif (GO) en serrant la poignée.

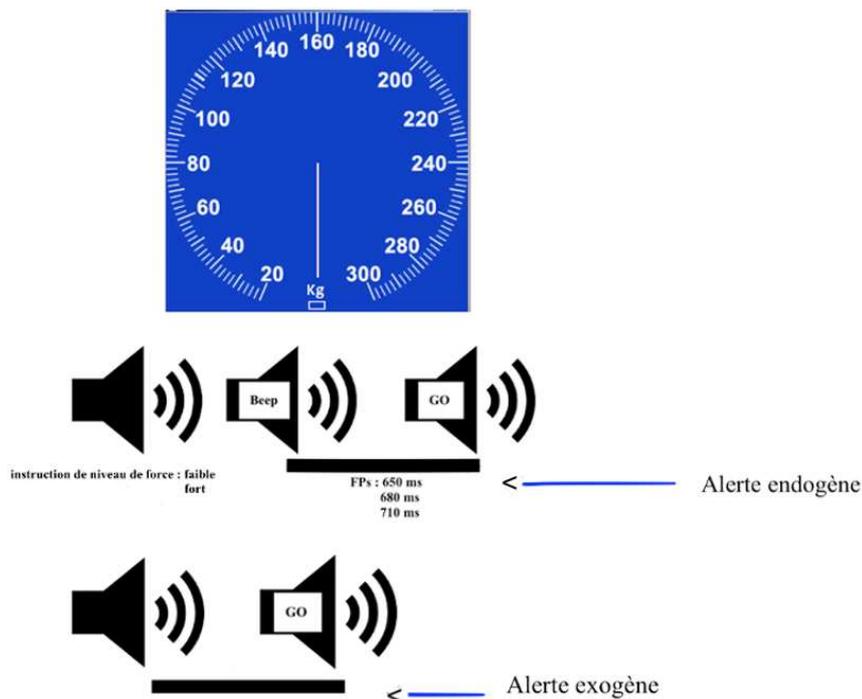


Figure 4. Tâche d'alerte endogène : les participants devaient répondre lorsqu'ils entendaient la cible go en serrant la poignée et en positionnant l'aiguille de la jauge sur la valeur numérique correspondant à 20 % (faible) ou 80 % (fort). Le bip du stimulus d'avertissement s'affichait pendant 50 ms et précédait le stimulus impératif (GO) avec des FPs variables ; alerte exogène : les participants devaient répondre lorsqu'ils entendaient GO en serrant la poignée.

1.12.3 MESURES ET ANALYSES COMPORTEMENTALES

TEMPS DE REACTION, FORCE ET ANTICIPATION

Les TRs et les mesures de force (faible et fort) étaient enregistrées par le logiciel E-prime (version 2.0.8.22) et le logiciel Acknowledge® (5.0.4). Les stimuli auditifs étaient programmés sur E-prime et synchronisés avec Acqknowledge pour apparaître comme des entrées numériques dans un canal séparé. La force était mesurée en utilisant la poignée TSD121B qui est connecté à Acqknowledge et l'acquisition du signal de force était enregistrée dans un canal séparé. Les valeurs de force étaient mesurées au pic du signal de force en kilogramme (kg).

Les moments de réponses (TR) étaient déterminés à partir du signal de force quand la dérivation du signal atteint 10 %, les TRs représentent les intervalles temporels qui séparent l'apparition de la cible (GO) et la dérivation du signal de force en millisecondes (ms).

Les anticipations représentent tous les réponses motrices qui précèdent l'apparition de la cible (GO), et sont inférieures à 100 ms.

LE RESPECT DES NIVEAUX DE FORCE : UNE TECHNIQUE D'APPRENTISSAGE MACHINE

À partir d'une méthode d'apprentissage machine, nous avons mesuré le taux de respect de niveau force pour étudier le compromis vitesse-précision.

Trois critères étaient utilisés pour évaluer la précision de réalisation de la force demandée. Le premier critère porte sur le pourcentage de respect du niveau de force. Le second porte sur l'aptitude à atteindre la force requise tandis que le troisième quantifie les fluctuations autour du niveau de force réalisé. Les trois critères sont détaillés ci-dessous.

Dans un premier temps, pour étudier l'aptitude des sujets à respecter les consignes de force, deux niveaux de force (faible et fort) sont décrits par « Normalized Peak Force » (NPF) qui correspond au pic de force normalisée pour chaque contraction et réorganisés en fonction des niveaux de force réalisés. Une approche de classification basée sur l'apprentissage automatique était menée, donnant lieu à deux classes réelles qui ne sont effectivement pas égales à celles

demandées. Une comparaison entre le niveau de force demandé et celui réalisé était analysée et exprimée en termes de pourcentage du niveau de force respecté.

Deuxièmement, nous étudions comment le pic de la force évolue en fonction de la tâche requise. Les valeurs moyennes de NFP sont déterminées pour chaque niveau de force dans les deux groupes de EM et sans EM. Une bonne précision est obtenue lorsque la valeur moyenne de chaque classe (faible, fort) est proche de celle recommandée (0.2, 0.8).

Troisièmement, l'écart type (SD) de NFP pour chaque niveau de force dans les deux groupes EM et sans EM est déterminé. Le coefficient de variation (CV), exprimé comme le rapport de l'écart type (SD) sur la moyenne, est calculé. Si ce rapport est faible, c'est-à-dire SD proche de la valeur moyenne, la précision d'obtention de la force requise sera donc considérée comme bonne.

1.12.4 MESURES ET ANALYSES NEUROPHYSIOLOGIQUES

MESURES ET ANALYSE DE LA REPONSE DE CONDUCTANCE CUTANEE (SCR)

Nous avons utilisé la SCR comme un marqueur de l'activité tonique du système nerveux sympathique sur les glandes sudoripares (Bard., 1929), elle peut quantifier l'impact de la composante sympathique du SNA sur le TR,

Nous estimons que c'est un indicateur fiable pour séparer les niveaux de force manipulés dans notre paradigme expérimental.

La SCR était enregistrée en utilisant des électrodes positionnées sur le majeur et les (premières) phalanges distales de l'index de la main non dominante en utilisant le GEL101 pour faciliter le contact, calibré sur les réponses de conductance cutanée en microsiemens (μS). Les données SCR étaient analysées comme décrit dans le manuel du logiciel AcqKnowledge sur la base des critères établis par (Scerbo & Reedman 1992). Le critère du plus petit SCR acceptable était fixé à 0,03 μS . Les SCRs étaient enregistrés en continu et simultanément pendant la tâche expérimentale à l'aide du système biopac MP160 avec la version 5.0.4 d'AcqKnowledge®.

RESPIRATION

Nous avons contrôlé la respiration pour éliminer toute possibilité d'influencer la VFC. Nous avons demandé aux participants de respirer normalement pendant la réalisation de la tâche

(Denver, Reed et Porges., 2007). La respiration a été enregistrée à l'aide d'un transducteur de respiration pneumatique (TSD221). La fréquence respiratoire a été extraite comme décrit dans le manuel du logiciel AcqKnowledge sur la base des critères établis par Grossman et al., (1990). Le signal respiratoire a été enregistré en continu et simultanément pendant la tâche expérimentale à l'aide du système biopac MP160 avec la version 5.0.4 d'AcqKnowledge ®.

MESURES ET ANALYSE D'UN ELECTROCARDIOGRAMME (ECG)

Nous avons mesuré la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) en utilisant des électrodes de la série EL500. Les positions des électrodes étaient appliquées selon la configuration commune de la dérivation lead II avec un GEL 100 pour faciliter le contact avec la peau.

Nous avons décomposé la VFC en deux composantes fréquentielles à l'aide d'une analyse spectrale : les basses fréquences (BF) et les hautes fréquences (HF). Qui étaient normalisés (Malliani, 1991 ; Montano, 1994), nous avons calculé la valeur relative de chaque composante proportionnellement à la puissance totale. Le rapport normalisé de LF sur HF en n.u met en évidence le comportement équilibré et contrôlé des branches sympathique et parasympathique du SNA. De plus, la normalisation tend à réduire l'impact des changements de puissance totale. La composante BF a une plage de fréquences comprise entre 0,04 et 0,15 Hz, tandis que la composante HF se produit à 0,15-0,4 Hz (Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology., 1996). Le rapport LF/HF en unités normalisées a fourni un indice d'équilibre des branches sympathiques et parasympathiques du SNA (Pagani et al., 1984 ; Malliani et al., 1991).

Les calculs sont décrits dans le manuel du logiciel AcqKnowledge selon les directives internationales (Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology., 1996; Berntson et al., 1997, 1998, 1990;). Le ECG était enregistré en continu et simultanément pendant la tâche expérimentale à l'aide du système biopac MP160 avec la version 5.0.4 d'AcqKnowledge ®.

1.12.5 ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses statistiques étaient effectuées sur JASP® version 1.16.1. La normalité de la distribution des données était déterminée avec le test de Shapiro-Wilk et l'égalité de la variance était déterminée avec le test de Levene et le test de Sphéricité. Le test du khi-deux était utilisé pour valider le pourcentage de respect de niveau de force déterminé pendant l'étape de classification de l'apprentissage machine (avec EM et sans EM) pour les FPs et les niveaux de force (faible et élevé) de l'étude. Une ANOVA mixte était appliquée pour analyser les résultats comportementaux (TRs,) en intra avec les facteurs FPs et niveaux de force et en inter pour les deux groupes. Lorsque l'ANOVA indiquait des effets principaux ou des interactions significatifs, un test post-hoc de Bonferroni était appliqué. Les effets de taille ont également été rapportés sous forme d'êta carré partiel (η^2). Une corrélation de Pearson était appliquée pour étudier la relation entre les composants sympathiques et parasympathiques et les TRs. Une régression linéaire était appliquée pour déterminer la prédiction de l'équilibre sympathovagal sur les TRs.

1.13 RESULTATS ET DISCUSSION DE LA TACHE D'ALERTE ENDOGENE

1.13.1 RESULTATS COMPORTEMENTAUX

TEMPS DE REACTION

Dans un premier temps, les temps de réaction (RT) étaient mesurés entre les deux groupes de participants tous niveaux de force confondus. L'analyse de la variance a montré une interaction significative [avec EM x sans EM], $F = 456.7$, $p < 0.001$; taille d'effet : η^2 partiel = 0.21. Pour le groupe avec EM, {moyenne = 307.08, SD = 56.9} ; l'intervalle de confiance (IC) 95% = [305.17; 308.99 ; pour le groupe sans EM, {moyenne = 342.56, SD = 59.60}; l'IC 95% = [340.56; 344.57]

Dans un deuxième temps, nous avons séparé les niveaux de force et les FPs dans chacun des groupes, une interaction significative a été observée entre les facteurs [Niveaux de force x FP x Groupes], $F = 122.03$, ($p < 0.001$) ; taille de l'effet : η^2 partiel = 0.07.

Dans le groupe avec EM, pour FP 650 ms, les comparaisons multiples de Bonferroni ont montré une différence significative ($p < 0.001$) entre le niveau de force faible {moyenne = 344.6, SD = 49.41}, l'IC 95% = [341.29; 347.65] et le niveau de force fort {moyenne = 323.80, SD = 49.78}; l'IC 95% = [320.47; 327.14].

Dans le groupe sans EM, pour FP 650 ms, aucune différence significative n'était observée entre les deux niveaux de force.

Dans le groupe avec EM, pour FP 710 ms, les comparaisons multiples de Bonferroni ont montré une différence significative ($p < 0.01$) entre le niveau de force faible moyenne = 268.3, SD = 547.68}, l'IC 95% = [265.07; 271.47] et le niveau de force fort {moyenne = 291.6, SD = 48.29}, l'IC 95% = [288.39; 294.87].

Dans le groupe sans EM, aucune différence significative n'était observée entre FP 710 ms et les deux niveaux de force.

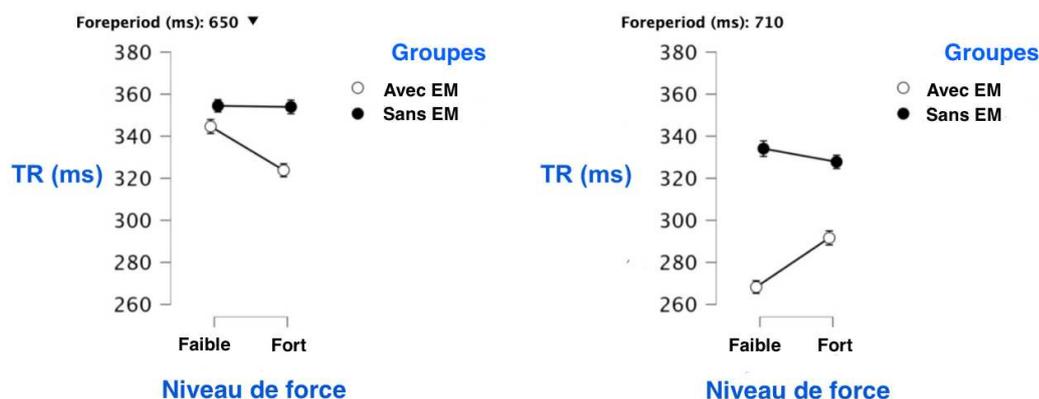


Figure 5 : résultats de l'analyse de la variance [groupes x FPs x niveaux de force] dans la tâche endogène.

ANTICIPATION

Dans un premier temps, les anticipations étaient mesurées entre les deux groupes (EM et sans EM) pendant toute la tâche sans séparer les FPs et les niveaux de force. L'analyse de la variance [avec EM x sans EM] a montré une différence significative, $F = 11,23$, $p < 0,001$ avec une large taille d'effet : η^2 partiel = 0,13. Pour le groupe avec EM {moyenne = 53,16, SD = 22,59}, l'IC 95% = [50,42 ; 55,91]. Pour le groupe sans EM, {moyenne = 61,4, SD = 24,34}, l'IC 95% = [57,48 ; 65,33]. Ce résultat suggère que les sujets ont massivement anticipé la cible après l'entraînement mental.

Dans un deuxième temps, une analyse plus détaillée des anticipations en fonction de FPs et de niveaux de force au sein du groupe avec EM étaient appliquées. Les comparaisons post-hoc Bonferroni ont montré une différence significative $p < 0,001$ entre FP 650 et niveau de force fort {moyenne = 43,84, SD = 18,99}, l'IC 95% = [42,25 ; 45,43] et FP 710 et niveau de force fort {moyenne = 65,43, SD = 20,96}, l'IC 95% = [63,67 ; 67,18].

Aucune différence significative n'était trouvée dans le groupe sans EM entre les FPs et les niveaux de force.

RESPECT DE NIVEAU DE FORCE

Pour FP 710 ms et un niveau de force faible, le pourcentage de respect du niveau de force a significativement augmenté (99.514 %) au sein du groupe avec EM comparé au groupe sans EM (90,87 %) {khi-deux = 237,41, $p < 0.001$ } (tableau 1) ; reflétant une plus grande précision dans le groupe avec EM.

Aucune différence significative n'a été observé pour un niveau de force fort entre les deux groupes et aucune différence significative n'était observée pour FP 650 entre les niveaux de force et les groupes.

Tableau 1 : résultats du respect de niveau de force (%).

Groupes	FP 650		FP 710	
	Faible (%)	Fort (%)	Faible (%)	Fort (%)
Sans EM	83.18	96.66	90.87*	91.16
	205 /218	191/196	209/256	168/176
Avec EM	80.90	93.75	237.41*	87.30
	200/208	200/220	167/170	186/193

*P < 0.001

1.13.2 INDICES DU SNA

CORRELATION ENTRE LA COMPOSANTE SYMPATHIQUE (LF ET SCR) ET PARASYMPATHIQUE (HF) ET LE TR DANS LE GROUPE AVEC EM

Nous avons appliqué une analyse corrélationnelle pour étudier la relation entre les indices du SNA et les TRs.

Pour la FP 650 ms et au niveau de force fort, la composante sympathique du SNA dominait dans le groupe avec EM. Les TRs étaient positivement et significativement corrélés avec la SCR {Pearson's $r = 0.51$ $p < 0.001$ } et avec la LF {Pearson's $r = 0.43$ $p < 0.001$ } et négativement et faiblement corrélés avec la HF {Pearson's $r = -0.20$ $p < 0.001$ } (figure 6). Aucune corrélation significative n'était observée dans le groupe sans EM.

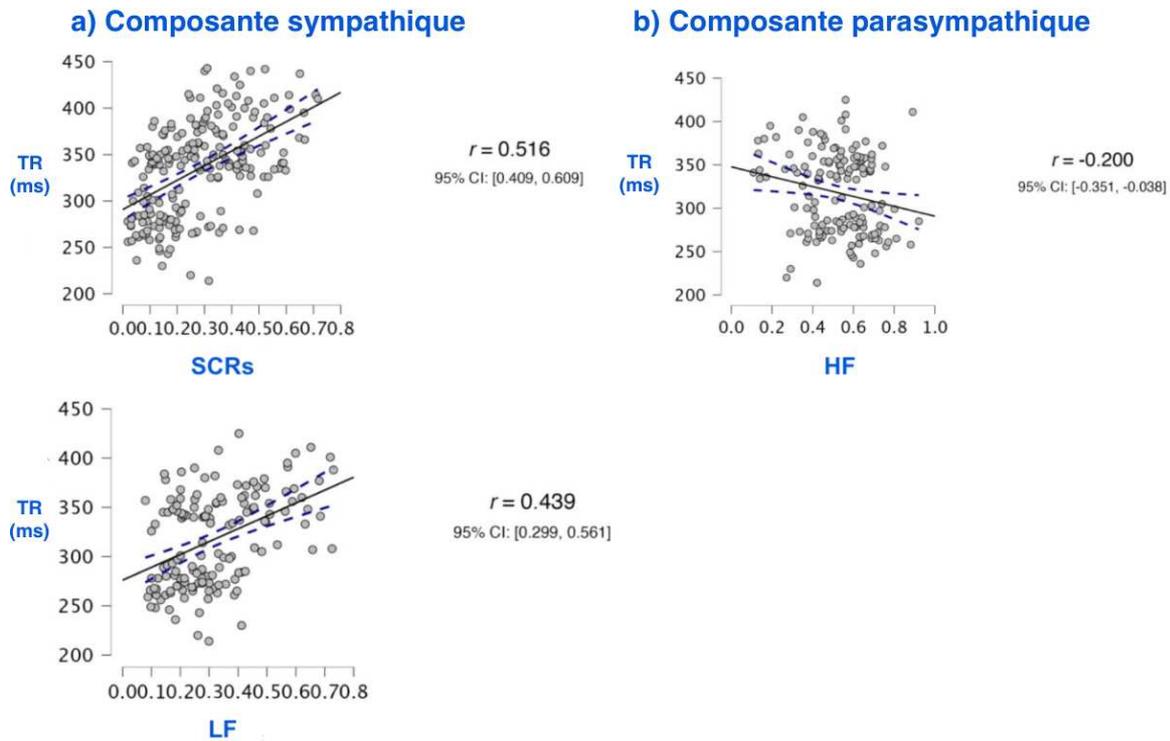


Figure 6 : a) une corrélation entre la LF et la SCR (composante sympathique) et les TRs. b) une corrélation entre la HF (composante parasympathique) et les TRs pendant la FP 650 et au niveau de force fort.

Pour la FP 710 ms et au niveau de force faible, la composante parasympathique du SNA dominait dans le groupe avec EM. Les TRs étaient positivement et faiblement corrélés avec l'activité SCR $\{r = 0.40 \text{ p} < 0.001\}$ et la LF $\{r = 0.30 \text{ p} < 0.001\}$ et négativement et fortement corrélés avec HF $\{r = -0.56 ; \text{P} < 0.001\}$ (figure 7). Aucune corrélation significative n'était observée dans le groupe sans EM.

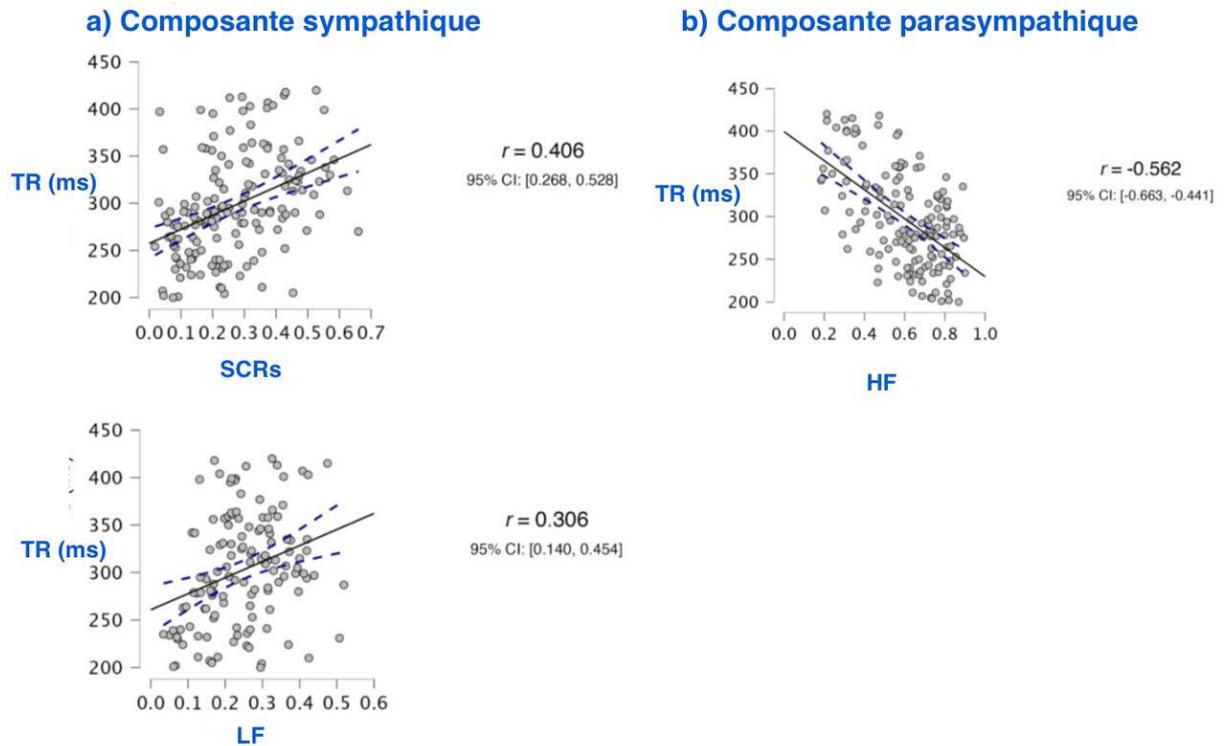


Figure 7 : a) une corrélation entre la LF et la SCR (composante sympathique) et les TRs. b) une corrélation entre la HF (composante parasympathique) et les TRs pendant la FP 710 et niveau de force faible.

ÉQUILIBRE SYMPATHOVAGAL

Une analyse de régression linéaire de l'équilibre sympathovagal, pour FP 710 ms et un niveau de force faible, a permis de prédire significativement, l'association entre le rapport LF/HF et les TRs dans le groupe avec EM, $R^2 = 0.21$; $\{F = 35.33 ; p < 0.001\}$ (figure 8), le rapport LF/LH reflète l'équilibre sympathovagal résultant de l'activation des voies sympathiques et parasympathiques du SNA.

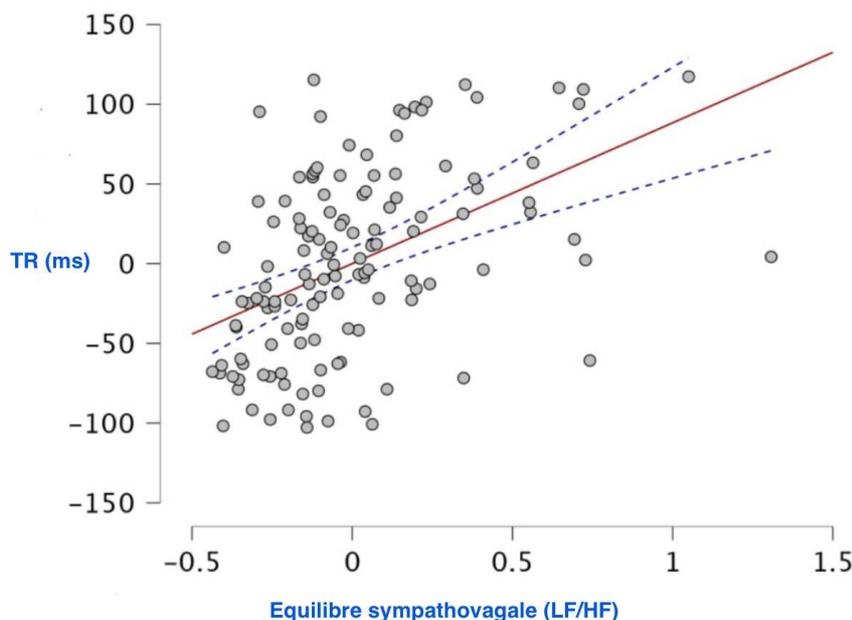


Figure 8 : Résultats de l'équilibre sympathovagal de la régression linéaire (LH/HF) et des TRs pendant la FP 710 et au niveau de force faible.

Aucune différence significative n'était observée entre le taux de respiration entre les deux groupes (EM et sans EM).

1.14 DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'examiner le phénomène de la préparation temporelle à travers des indicateurs comportementaux et neurophysiologiques.

Les résultats comportementaux après la session de l'EM, indiquent une amélioration significative des TRs notamment pour la FP longue (710) par rapport à la FP courte (650). Ce résultat est une réplification des résultats obtenus par d'autres auteurs explorant la préparation temporelle qui considèrent que les TRs sont plus rapides lorsque la cible est précédée d'un stimulus avertisseur (Niemi et Näätänen, 1981 ; Hackley, 2009). En fait, nous avons utilisé des FPs variables mais relativement proches qui permettaient une allocation efficace des ressources attentionnelles pour répondre à des moments proéminents (Elithorn et Lawrence, 1995). Les participants sont néanmoins plus efficaces avec les FPs longues facilitant un contrôle descendant (top down) de l'attention (Posner, Cohen, & Rafal, 1982 ; Connor, Egeth et Yantis.,

2004) ; en particulier, nous avons utilisé un stimulus auditif très court (50 ms) au regard des durées FPs pour accroître l'estimation de l'occurrence de la cible.

Pendant la FP la plus courte (650 ms) et après EM, nous avons observé que le niveau de force fort dominait les TRs. Ce résultat peut s'expliquer par l'interférence entre l'instruction du niveau de force et la préparation temporelle. Autrement dit, les participants associaient le niveau de force fort au stimulus avertisseur (bip) et non à la cible (GO) comme l'exigeait la tâche. En outre, nous avons observé un taux d'anticipation très élevé. De plus, l'EM n'a pas amélioré le respect du niveau de force (précision de la réponse motrice).

Nous suggérons que l'attention était partagée entre l'effort physique (tâche de serrage) et l'indice temporel de l'alerte, un état cognitif nécessitait la synchronisation de l'effort physique au stimulus impératif.

Cette interprétation est soutenue par Kahneman (1973) et Daly (2020) qui considèrent que l'interférence entre les signaux est due à une insuffisance du déploiement temporel de l'attention liée aux exigences de la tâche, notamment lorsque la tâche nécessite un effort mental important comme dans le cas de cette étude.

Dans le même ordre d'idées, nous supposons que la modulation de la mémoire de travail avec les deux niveaux de force (notamment le niveau fort) durant des FPs courtes, polarise soudainement l'arousal vers le stimulus avertisseur. Ainsi, un niveau de force fort pendant une FP courte manifeste une interférence en mémoire de travail qui réduit l'allocation des ressources aux moments de la cible produisant un phénomène d'incapacité à contrôler temporellement l'engagement de l'attention endogène (phénomène de rétrécissement ou de goulet d'étranglement de l'information).

Après EM et pendant la FP longue (710), nous avons observé que le niveau de force faible dominait les TRs ; ce résultat signifie que les participants associent le niveau de force faible à la cible comme l'exige la tâche. Ce résultat s'explique par le fait que le niveau de force faible ne nécessite pas un effort physique important, les participants se préparent temporellement durant la FP en se concentrant sur la cible (GO). De plus, nous avons observé une amélioration significative de la précision des réponses motrices ; les sujets respectent mieux le niveau de force faible, le taux de respect de niveau de force atteint 96,55 % avec un niveau d'anticipation très faible. Ce résultat va dans le sens de l'étude de Lawrence et Klein (2013) qui considèrent que l'attention temporelle purement endogène basée sur la contingence signal-cible améliorerait la vitesse et la précision de la réponse.

Nous pouvons également interpréter ce résultat par une variation de l'arousal autonome pendant l'EM. La session d'EM a renforcé l'état d'arousal autonome et le contrôle attentionnel durant les FPs longues. Ainsi, les FPs longues et le faible niveau de force créent un état d'attention soutenue et optimale où l'arousal autonome est prolongé pendant une période de temps qui permet de maintenir la concentration avec un effort constant en sollicitant efficacement les ressources attentionnelles (Johnsen et al., 2002, Petersen et Posner, 2012).

Nous avons mesuré l'activité du SNA afin d'examiner s'il y avait une interaction significative entre les composants sympathiques, parasympathiques et l'indicateur cognitif (TR). Les analyses corrélationnelles et de régression ont montré après EM qu'il existait une relation entre les indicateurs du SNA et la performance cognitive.

Pour les FPs courtes (650) et le niveau de force fort, les résultats neurophysiologiques et comportementaux ont montré que l'augmentation des TRs était positivement corrélée à l'augmentation de l'activité sympathique (SCR) et négativement corrélée à la diminution de l'activité parasympathique (HF). Cela signifiait que la composante sympathique du SNA se mobilisait dans des conditions correspondant à une interférence de signal dans laquelle les participants étaient relativement rapides et non précis.

Ce résultat était cohérent avec les études sur l'effort mental et l'attention de Kahneman, Beatty & Pollack, 1967 ; Kahneman, Tursky, Shapiro et Crider, 1969 ; Kahneman, 1973 ; Smit, 2004 ; Lundberg, 1980). En effet, Kahneman a montré que les SCRs augmentaient dans les conditions qui nécessitaient un effort mental où les participants déployaient insuffisamment leur attention. Lundberg (1980) a confirmé que l'effort mental était lié à l'augmentation de l'arousal autonome telle que la SCR et la fréquence cardiaque. De plus, Elliott (1969) a montré que l'activité sympathique accompagnait l'anticipation comme nous l'avons montré dans notre étude. De plus, Gianaros et al, (2004) et Lee et Liu (2003) ont découvert que la diminution de l'activité de la composante parasympathique (HF) était liée à la mémoire de travail et à l'effort mental.

D'autre part, une faible activité vagale reflétait une faible capacité cognitive aux exigences des tâches (Hansen, Johnsen & Thayer, 2003). La diminution de la VFC (RMSSD) lors de l'augmentation de la charge de la mémoire de travail a également été montrée par Backs et Seljos (1994).

Nous suggérons sur le plan biologique que la corrélation observée avec les TRs pendant les FPs courtes et le SNA pourrait correspondre aux voies sympathiques qui libèrent l'adrénaline et la

noradrénaline. Ce neurotransmetteur remplit des fonctions homéostatiques et cognitives, notamment en lien avec l'attention, l'éveil, la mémoire et l'apprentissage (Huether, 1996 ; Sved et al., 2001).

Pour les FPs longues et niveau de force faible, les résultats montrent que la diminution des TRs était négativement corrélée à l'augmentation de l'activité parasympathique (HF) et positivement corrélée à l'activité sympathique (SCR). Ce résultat signifie que la composante parasympathique du SNA est engagée lorsque les participants sont constamment concentrés, reflétant une meilleure performance cognitive.

Notre résultat est conforme aux travaux de Porges (1992) qui a prédit et montré qu'une activité vagale cardiaque élevée indiquait une bonne capacité attentionnelle. De même, Lacy et Lacy (1958) ont rapporté une relation entre les TRs et les fluctuations autonomes. Cette observation a également été renforcée par les résultats de Chase, Graham & Graham (196), Connor & Lang, (1969), Graham & Clifton, (1966) et Elliott (1969) considérant que la décélération cardiaque (dominance parasympathique) se produisait durant des intervalles FPs reflétant probablement l'inhibition d'une réponse non pertinente et prématurée pour faciliter une réponse rapide et efficace.

Notre étude renforce la suggestion de Posner & Boies (1971) qui considèrent que les intervalles FP représentent une combinaison d'inhibition et d'augmentation de l'arousal autonome.

D'un point de vue biologique, les voies parasympathiques sont des médiateurs de l'acétylcholine synthétisée par les neurones cholinergiques (Loewi 1921) ; il était montré que les neurones cholinergiques modulaient le contrôle de l'attention et la capacité de réflexion (Azevedo 2009).

De plus, nous montrons dans notre étude une relation prédictive entre le SNA et l'attention. Nous avons observé pendant les FPs longues et un niveau de force faible que l'équilibre sympathovagal (LF/HF) permet de prédire la performance cognitive.

Ce résultat va dans le sens de la relation prédictive entre la VFC et les processus cognitifs de Hansen, Johnsen & Thayer, (2003). Ces auteurs prédisent un compromis vitesse-précision à travers une VFC élevée. De plus, les études de Porges (1972), Backs et Seljos (1994) et Backs et Ryan (1992) avaient prédit que les TRs rapides étaient attendus pendant une activité vagale élevée.

1.15 RESULTATS ET DISCUSSION DE LA TACHE D'ALERTE EXOGENE

1.15.1 RESULTATS COMPORTEMENTAUX

1.15.1.1 TEMPS DE REACTION

L'analyse de la variance (ANOVA) n'a montré aucune différence significative entre les TRs dans le groupe avec EM et le groupe sans EM concernant la tâche d'alerte exogène.

1.15.1.2 TAUX D'ANTICIPATION

Le test du khi-deux a montré une augmentation du taux d'anticipation après EM, en condition exogène, avec un pourcentage croissant de 2,29 % sans EM à 16 % avec EM { $X^2 = 149,24$, $p < 0,001$ }.

1.15.2 CORRELATION ENTRE LES ANTICIPATIONS ET L'ACTIVITE SYMPATHIQUE

Après EM, l'analyse corrélationnelle entre le taux d'anticipation et l'activité sympathique a montré que les anticipations étaient positivement et négativement corrélées avec la mesure SCR reflétant l'activité sympathique [$r = -0.26$; $p < 0.001$] ; et positivement et négativement corrélées avec la HF composante de l'activité parasympathique [Pearson $r = -0.24$; $p < .001$]. Le résultat de la mesure SCR était corroboré< par la composante LF de la VFC.

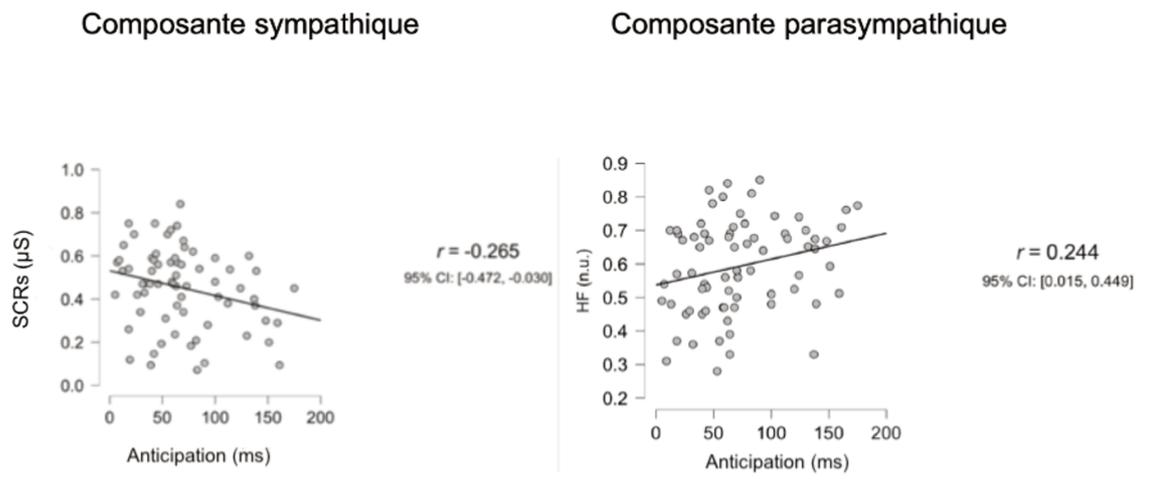


Figure 9 : Une corrélation entre la SCR (composante sympathique) et les anticipations. Une corrélation entre la HF (composante parasympathique) et les anticipations pendant l'alerte exogène.

1.16 DISCUSSION

L'objectif de la manipulation de l'alerte exogène était d'étudier le rôle du système bottom-up non-volontaire de l'attention temporelle.

Dans la condition d'alerte exogène de l'attention, aucune différence significative n'a été observée entre les TRs entre le groupe avec EM et le groupe sans EM. Ce résultat signifie que l'entraînement mental du contrôle attentionnel dans le cas de l'alerte exogène ne renforce pas la préparation temporelle. En revanche, sur le plan comportemental, nous avons observé avec la tâche d'alerte exogène après EM que le taux de pourcentage d'anticipation avait augmenté 8 fois plus comparé à la tâche d'alerte exogène sans EM. Nous expliquons ce résultat par le fait que l'alerte exogène de l'attention de par sa sensibilité à des événements rapides (signal Go), répétitifs (entraînant un automatisme) et non contrôlés devait entraîner une réponse des sujets de manière implicite et stéréotypée.

D'après Kahneman, l'anticipation en tant que réponse rapide est une opération automatique du système bottom up (dénommé système 1), qui implique l'élaboration d'une réponse automatisée suite à un apprentissage développé avec la répétition pendant l'EM qui pourrait être lié à la connaissance tacite ce que Sternberg (2000) nomme l'intelligence pratique.

Notre interprétation était suggérée par Hackley Valle-Inclán (2003) qui considère que l'attention tend à être répartie plus au moins uniformément sur toutes les périodes qui précèdent la cible, par conséquent, le sujet anticipe intuitivement le moment de l'arrivée du stimulus impératif (GO).

Nous suggérons ainsi que le taux d'anticipation élevé avec la tâche d'alerte exogène indique une sorte d'apprentissage implicite qui s'est produit pendant la session d'EM. En effet l'EM peut favoriser l'encodage et la récupération de traces mnésiques qui étaient activées automatiquement pendant la tâche réelle (Hintzman, Block & Summer, 1975).

Notre point de vue est soutenu par les travaux de Reber (1989) qui considère que l'apprentissage implicite opère automatiquement et intuitivement.

Aussi, nous avons observé que l'anticipation était corrélée négativement et significativement avec l'activité sympathique mesurée à partir de la SCR. Ce résultat intéressant va dans le sens des travaux de Critchley (2002) qui considèrent que l'anticipation mesurée à l'aide de la réponse de la conductance cutanée du système nerveux sympathique était associée à un niveau d'arousal élevé.

Biologiquement parlant, l'arousal est géré par les systèmes noradrénergiques et cholinergiques provenant de la partie ponto-mésencéphalique du tronc cérébral (Clemens et al., 2011 ; Gaspar, Berger, Febvret, Vigny, Henry, 1989 ; Jones, 2003 ; Robinson Coyle, 1980). Nous supposons que l'arousal augmente sous l'effet de l'activation du système nerveux sympathique pour soutenir le processus cognitif de mobilisation nécessaire à l'anticipation (Porges, 1998 ; Tarchanoff, 1890).

1.17 CONCLUSION

À travers la tâche d'alerte endogène, nous avons montré que les indices du SNA et les marqueurs cognitifs contribuaient significativement à la performance attentionnelle sur différentes FPs. Nous avons établi une relation linéaire entre l'équilibre sympathovagal et les performances cognitives et nous proposons une méthode issue de l'intelligence artificielle pour évaluer le compromis vitesse-précision.

Concernant les résultats de la tâche d'alerte exogène après EM, de manière inattendue, nous avons observé un taux d'anticipation significativement très élevé et corrélé à la SCR de l'activité sympathique du SNA.

CHAPITRE 3 :

ÉTUDE DE L'INHIBITION MOTRICE

1.18 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans la première étude, nous avons utilisé une tâche d'alerte endogène et exogène de l'attention pour étudier les effets FPs, l'intensité de l'effort et l'EM dans la préparation temporelle que nous avons reliée à des indicateurs du SNA. Une partie des participants devaient réaliser la tâche mentalement sans produire de réponse motrice. Pendant cette période d'entraînement du contrôle attentionnel, l'inhibition motrice était sollicitée et mesurée en continue tout au long de la session d'entraînement à partir des indicateurs neurophysiologiques du SNA avec l'ECG et la réponse de conductance cutanée.

La relation SNA - inhibition a fait l'objet de plusieurs recherches. Hansen et al (2003) et Sutterlin et al (2011) ont montré que la modulation vagale de la VFC était associée à un fonctionnement exécutif optimal. À l'inverse, certaines études suggèrent que le fonctionnement exécutif, en particulier l'inhibition, pourrait être altéré dans des conditions avec une capacité de régulation autonome réduite (e.g. une augmentation accrue de l'activité sympathique) (Robbins et al 2005). De même, Williams et al (2015, 2016) ont montré que plus la VFC d'un individu est élevée, meilleures sont les performances dans les tâches nécessitant une inhibition motrice.

Dans une méta-analyse de Holzman et Bridgett (2017), la VFC était établie comme un biomarqueur de régulation du mécanisme top down. Ainsi, il semble y avoir une relation étroite entre une fonction vagale et un meilleur contrôle inhibiteur. Par ailleurs, Craig (2009) a mentionné que les centres corticaux attentionnels ont accès à l'état homéostatique interne et pouvaient déclencher des réponses régulatrices par le biais d'un ajustement autonome qui se traduisait par une diminution de la conductance cutanée lors de l'inhibition d'une réponse motrice. De même, Jennings et Wood (1977) ont suggéré que les réponses motrices dans les tâches de temps de réaction simples pouvaient être influencées par les cycles diastolique et systolique de l'activité cardiaque.

Au regard de ces études, nous avons choisi d'étudier l'inhibition motrice en utilisant un paradigme stop signal qui sollicite essentiellement les fonctions motrices des participants et permet de mesurer leurs capacités inhibitrices, à l'aide d'un modèle de course de cheval développé par Verbruggen et Logan. Comme l'ont suggéré Daly et al en 2020, nous montrerons

que l'entraînement mental attentionnel renforce l'arousal physiologique ainsi que les interactions entre les paramètres du SNA et ceux de l'inhibition motrice.

1.19 METHODE

1.19.1 PARTICIPANTS

Quarante participants (19 femmes et 21 hommes) âgés de 20 à 35 ans (moyenne = 28.3 ; SD = 5.28) sans troubles psychiatriques, neurologiques ou sensorimoteurs. Dans cette étude, nous comparons deux groupes : un groupe avec entraînement mental (avec EM) qui a s'est entraîné mentalement avant la tâche physique réelle (n=20) et un groupe sans entraînement mental (sans EM) (n=20).

1.19.2 PARADIGME EXPERIMENTAL

La tâche d'entraînement mental

La tâche d'entraînement mental du contrôle attentionnel correspond à la tâche d'alerte utilisée dans la première étude.

Le participant réalise la tâche mentalement sans production motrice.

La tâche d'alerte est constituée de 8 blocs de deux tâches alertes. Une alerte endogène et une alerte exogène.

Dans la tâche endogène, nous avons manipulé deux niveaux de force opposés (faible et fort) ; avec trois FPs (650, 680 et 710 ms) ; Les FPs et les niveaux de force étaient randomisés. L'intervalle FP sépare un stimulus l'indice (avertisseur) (bip) d'un stimulus impératif (GO) et prépare temporairement les participants à répondre en serrant la poignée aussi rapidement et aussi précisément que possible (Posner, 1973 ; Lawrence et Klein, 2013).

Au début de chaque bloc, une instruction auditive était générée pour préciser le niveau de force requis dans une série de 7 essais consécutifs où seuls les FPs variaient. Les participants devaient se préparer mentalement quand ils entendront le bip (stimulus avertisseur) et répondre au GO (stimulus impératif), ils devaient atteindre les valeurs de niveau de force sur la jauge projetée

sur l'écran. Le retour visuel (jauge) permet de produire un niveau de force approprié et de contrôler les réponses motrices attendues des sujets.

La tâche d'alerte exogène est une tâche de contrôle, nous ne manipulons pas la préparation temporelle. Le participant doit répondre au stimulus impératif (GO) en serrant la poignée.

Tâche stop signal

Pour mesurer l'inhibition nous avons utilisé le paradigme de stop signal de Lappin & Eriksen (1966) ; Logan & Cowan & Davis (1984) ; Vince (1948). Le paradigme correspond à une tâche de TR simple avec un signal d'arrêt auditif ordonne d'inhiber la réponse.

Pour expliquer cette observation, Logan et ses collègues (Logan, Cowan, & Davis, 1984 ; Boucher, Palmeri, Logan, & Schall, 2007) ont proposé un modèle de course de chevaux, en supposant que l'inhibition de la réponse réussit ou échoue, selon le temps relatif aux deux processus :

- Un processus de départ déclenché par un stimulus impératif (cercle ou carré), l'utilisation de deux types de stimuli différents pour réduire le taux d'anticipation et solliciter la précision.
- Un processus d'arrêt déclenché par le signal stop (bip).

L'intervalle temporel entre stimulus impératif et le signal d'arrêt s'appelle le délai stop signal (SSD). Lorsque le délai SSD augmente, la probabilité d'inhiber la réponse augmente. Si le processus d'arrêt se termine avant le processus de départ, les sujets inhibent leurs réponses. Si le processus de départ se termine avant le processus d'arrêt, les sujets ne parviennent pas à inhiber leurs réponses.

Les essais sans la présentation d'un signal d'arrêt représentent 75 % de l'ensemble des essais, seul le stimulus de la tâche principale est présenté et les sujets sont invités à répondre au stimulus aussi rapidement et précisément que possible. Les essais avec un signal d'arrêt (25 % des essais), le stimulus de la tâche principale est suivi d'un signal d'arrêt auditif, et les sujets sont invités à retenir leurs réponses.

Les stimuli de la tâche principale sont un carré et un cercle. Un signe de fixation (+) et les stimuli sont présentés au centre de l'écran, en blanc, sur un fond noir.

Le programme démarre lorsque l'utilisateur saisit un numéro de participant. Ensuite, les instructions de la tâche sont présentées à l'écran. L'expérience se compose de deux phases : une phase pratique de 32 essais et une phase expérimentale de trois blocs de 64 essais.

Dans les deux phases, chaque essai commence par la présentation du signe de fixation (+), qui est remplacé par le stimulus de la tâche principale après 250 ms. Par défaut, les touches de réponse sont « Z » (pour le carré) et « / » (pour le cercle). L'expérience est interrompue lorsque la touche ESC est enfoncée. Le stimulus reste à l'écran jusqu'à ce que les sujets répondent, ou jusqu'à ce que

1250 ms (c'est-à-dire TR maximale) se sont écoulées. L'intervalle interstimulus par défaut est de 2000 ms. Lors des essais de signal d'arrêt, un signal d'arrêt est présenté après un SSD variable. Entre les blocs, les sujets doivent attendre 10 secondes avant de pouvoir commencer le bloc suivant. Pendant cet intervalle, les sujets recevront des informations sur leurs performances : le nombre de réponses incorrectes sur les essais sans signal, le nombre de réponses manquées sur les essais sans signal, le TR moyen sur les essais sans signal.

1.19.3 MESURE DE TEMPS DE REACTION STOP SIGNAL (SSRT)

Le SSRT était calculé à partir d'une procédure en escalier qui permettait de réactualiser le SSD et de connaître le taux de succès pour 50% des essais stop (Li et al., 2005) ; et deux indices étaient retenus, le TR des essais go et le délai de stop signal (SSD) de chaque essai.

Le SSRT était estimé en soustrayant le SSD critique (maintien de la réponse aux essais stop) au TR moyen des essais Go (Figure 10) Logan & Cowan & Davis 1984).

Ces deux indicateurs sont automatiquement calculés et générés par l'algorithme implémenté dans le programme stop signal. Le SSD était initialement fixé à 250 ms et est ajusté en continu avec la procédure : Lorsque l'inhibition est réussie, le SSD augmente de 50 ms ; lorsque l'inhibition échoue, le SSD diminue de 50 msec.

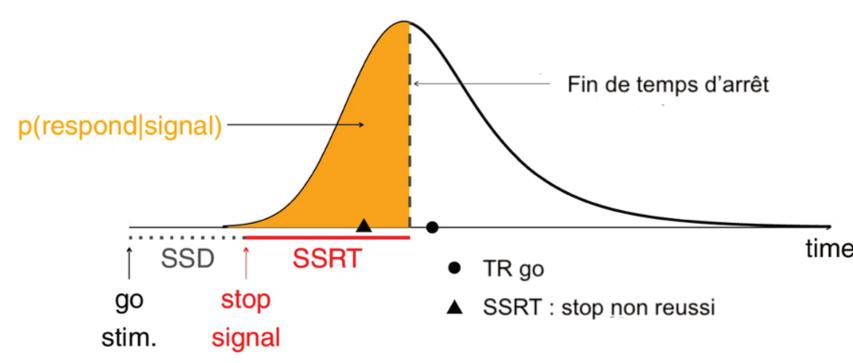


Figure 10 : Présentation d'un essai stop signal. Le temps de réaction stop signal (SSRT) = TR moyen des essais GO - le SSD critique (maintien de la réponse aux essais stop) analyse du signal ECG (Li et al., 2005).

L'ECG cardiaque était enregistré en continu et simultanément pendant la tâche stop signal à l'aide du système biopac MP160 avec la version 5.0.4 d'AcqKnowledge®.

Le signal ECG était analysé en utilisant deux méthodes différentes :

En premier lieu, nous avons déterminé le moment d'apparition de la réponse SSRT sur le tracé ECG s'il correspond à une phase de diastole ou de systole cardiaque. La détermination de cycles cardiaques était estimée à partir de la méthode de Rae, Botan et al. (2018). La systole cardiaque était déterminée au pic de l'onde T de l'ECG, à 290 ms suivant le pic de l'onde R, elle correspond à la phase de contraction des ventricules et pour éjecter le sang dans les artères. Alors que, la diastole cardiaque est à 10 ms avant le pic de l'onde R, elle correspond à la phase de relâchement des oreillettes et des ventricules cardiaques et le remplissage de sang (Figure 11) (Rae, Botan et al. 2018).

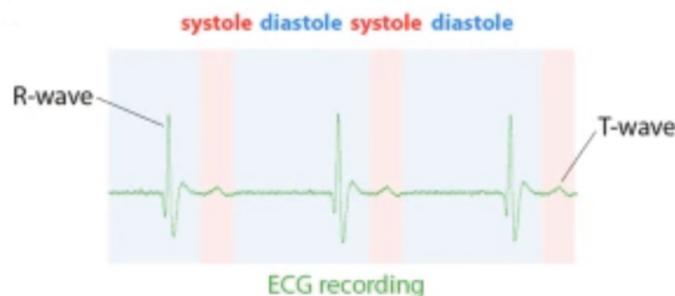


Figure 11 : cycle cardiaque : la systole se produit autour de l'onde t, qui est généralement d'environ 300 ms après l'onde r. la diastole cardiaque se produit à 10 ms avant le pic de l'onde r (Rae, Botan et al. 2018).

En deuxième lieu, nous avons estimé la VFC à partir d'une analyse temporelle du signal ECG ; c'est le RMSSD qui correspond à la moyenne quadratique des intervalles R-R successifs (figure 12), l'analyse était conforme aux instructions indiquées dans le AcqKnowledge selon la directive internationale (Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology., 1996).

Le RMSSD s'exprime en millisecondes et était calculé comme suivant :

$$RR1-RR2=D1$$

$$RR2-RR3 = D2$$

$$RR3-RR4 =D3$$

$$RR\ n-1-RR\ n = Dn-1$$

Ces différences sont ensuite utilisées dans l'équation :

$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} D_i^2}{n-1}}$$

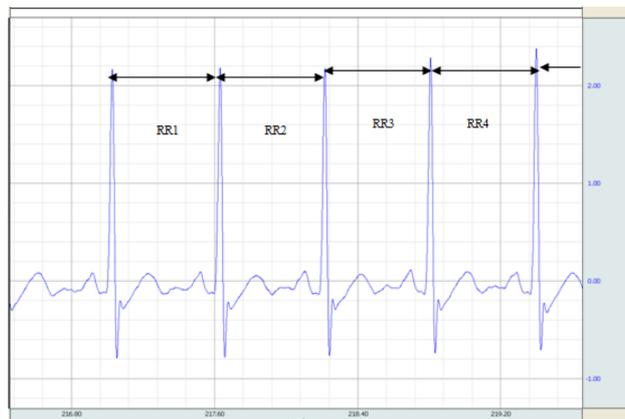


Figure 12 : Intervalles RR successifs utilisés pour calculer le RMSSD.

1.19.4 ANALYSE DE LA REPONSE ELECTRODERMALE (SCR)

La SCR était analysée suivant les instructions du logiciel AcqKnowledge sur la base des critères établis par (Scerbo & Reedman 1992). Le critère du plus petit SCR acceptable était fixé à 0,03 μ S.

Les SCRs étaient enregistrées en continu et simultanément pendant la tâche stop signal à l'aide du système biopac MP160 avec la version 5.0.4 d'AcqKnowledge®.

1.19.5 ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses statistiques étaient effectuées sur JASP® version 1.16.1. La normalité de la distribution des données était déterminée avec le test de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) et l'égalité de la variance était déterminée avec le test de Levene ($p > 0,05$).

Une analyse de variance mixte (ANOVA) était appliquée pour analyser les SSRT en fonction des cycles cardiaques (diastole, systole) et des groupes (avec EM, sans EM). Lorsque l'ANOVA indiquait des effets principaux significatifs ou des interactions, un test post-hoc de Bonferroni était appliqué. Les effets de taille ont également été rapportés sous forme d'êta partiel au carré (η^2).

Une corrélation de Pearson était appliquée pour étudier la relation entre les composants sympathiques et parasympathiques et les SSRT.

1.20 RESULTATS

1.20.1 TEMPS DE REACTION STOP SIGNAL (SSRT) EN FONCTION DES PHASES

DIASTOLIQUES ET SYSTOLIQUES DU RYTHME CARDIAQUE

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré une interaction significative [Groupes X Cycles cardiaques : diastole systole], $\{F = 125.007 ; P < 0.001\}$; taille de l'effet : η^2 partiel = 0.104.

Pour le groupe avec EM, le SSRT était plus court en phase de diastole ; l'ANOVA a montré une différence significative entre le SSRT en phase de diastole $\{\text{mean} = 161.69 ; \text{SD} = 42.92\}$, $P < 0.001$, l'IC (95%) = $\{160.39, 162.99\}$ et le SSRT en phase de systole $\{\text{mean} = 250.46 ; \text{SD} = 44.70\}$, $P < 0.001$, l'IC (95%) = $\{245.96, 254.95\}$. Pour le groupe sans EM, aucune différence significative n'était observée entre les deux phases cardiaques (figure 13).

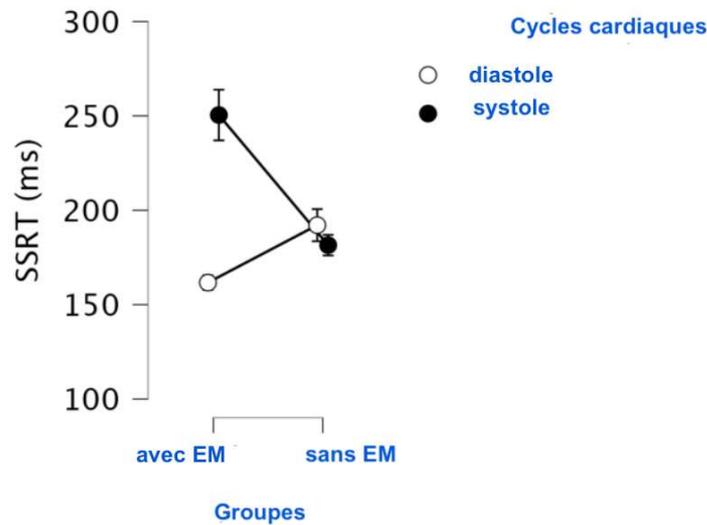


Figure 13 : Résultats de temps de réaction stop signal (SSRT) [groups x cycles cardiaques] pendant la tâche stop signal.

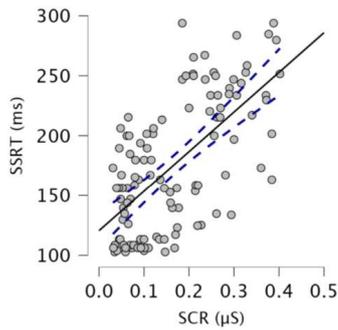
1.20.2 CORRELATION ENTRE LA COMPOSANTE SYMPATHIQUE (SCR) ET PARASYMPATHIQUE (RMSSD) ET LE SSRT DANS LE GROUPE AVEC EM

Nous avons appliqué une analyse corrélationnelle pour étudier la relation entre les indices du SNA et le SSRT.

Le SSRT était positivement et significativement corrélé avec la SCR {Pearson's $r = 0.64$ $p < 0.001$ } et négativement corrélé avec le RMSSD {Pearson's $r = -0.66$ $p < 0.001$ }.

Aucune corrélation significative n'était observée dans le groupe sans EM (figure 14).

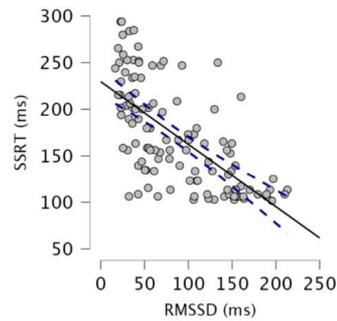
a) Composante sympathique



$$r = 0.641$$

95% CI: [0.516, 0.739]

b) Composante parasympathique



$$r = -0.663$$

95% CI: [-1.000, -0.567]

Figure 14:) une corrélation entre la SCR (composante sympathique) et le SSRT. b) une corrélation entre le RMSSD (composante parasympathique) et les SSRT.

1.21 DISCUSSION

L'objectif de l'expérience est d'étudier les mécanismes d'inhibition produits par la tâche d'EM sur les réponses des sujets et de déterminer le rôle du SNA dans les processus d'inhibition.

Après la session de l'EM, nous avons observé que le SSRT était clairement diminué traduisant ainsi une meilleure capacité d'inhibition notamment pendant la phase de diastole cardiaque.

Cognitivement, ce résultat signifie que les participants géraient mieux la latence de l'inhibition motrice après EM ; cela pourrait être expliqué par un rallongement de la course temporelle au stimulus go au regard du processus stop lié à une augmentation des ressources attentionnelles et de la concentration.

Aussi, nos résultats montrent que le contrôle de l'inhibition varie en fonction du cycle cardiaque diastolique et systolique.

D'un point de vue neurophysiologique, ce résultat pourrait être interprété par le fait que l'arousal communique avec le cerveau par des afférences cardiovasculaires. Le déclenchement phasique des afférences cardiovasculaires transférées aux noyaux du tronc cérébral transmettrait des informations sur le moment et la fréquence des battements cardiaques (Garfinkel et Critchley., 2016). Par l'intermédiaire du tronc cérébral, les centres corticaux auraient un accès rapide à l'état physiologique homéostatique interne et pourraient ainsi déclencher des réponses cognitives adaptées (Craig., 2009 ; Critchley., 2005). Garfinkel et

Critchley. (2016) et Garfinkel. (2014) ont suggéré que les fluctuations de l'activité cardiaque modifieraient les seuils de détection rapide des stimuli. De même, ces signaux physiologiques afférents pourraient produire des réponses motrices rapides et adaptées aux événements saillants.

Notre suggestion du rôle de l'arousal physiologique qui émanerait du SNA dans l'amélioration de l'inhibition est soutenue par les travaux de Birren et al. (1963) et Jennings et Wood (1977). Ces auteurs ont suggéré que les réponses motrices dans les tâches de temps de réaction simples pouvaient être influencées par les cycles diastolique et systolique de l'activité cardiaque.

Récemment, Garfinkel et al. (2013) ont observé que l'activité cardiovasculaire autonome impacterait la performance de la mémoire de travail, mettant en évidence le rôle de la métacognition et de la sensibilité intéroceptive.

Concernant la sensibilité intéroceptive, Rae, Botan et al. (2018) ont mentionné que la systole cardiaque était caractérisée par un déclenchement élevé des barorécepteurs qui peut être considéré comme un corrélant transitoire de l'excitation sympathique, tandis que la diastole se caractériserait par un déclenchement faible des barorécepteurs (cœur en phase de relaxation) qui activerait des états parasympathiques.

D'autres arguments biologiques de l'influence parasympathique de la fréquence cardiaque seraient médiés par la libération d'acétylcholine par le nerf vague qui inhibe le courant cardiaque activé par l'hyperpolarisation (Noma A, Trautwein., 1978 ; Osterrieder, Noma et Trautwein., 1980 ; Akmann, Noma and Trautwein., 1983) et engendrerait une dépolarisation diastolique (Irisawa, Brown HF et Giles., 1993 ; Irisawa et Giles., 1990)

L'influence sympathique de la fréquence cardiaque serait médiée par la libération d'épinéphrine et de noradrénaline permettant l'activation de récepteurs β -adrénergiques, ces derniers entraînent une accélération de la dépolarisation diastolique (DiFrancesco et al., 1986).

La preuve d'une interaction entre les deux cycles cardiaques (diastole et systole) et les deux branches du SNA est renforcée par nos résultats de la VFC.

En effet, après EM, nous avons observé une augmentation de l'indice temporelle RMSSD expliquant un véritable renforcement de la composante parasympathique du SNA. Nous avons aussi observé une diminution de la SCR représentative de la composante sympathique.

En effet, une mesure spectrale et temporelle de la VFC semble un indicateur pertinent pour évaluer les fluctuations parasympathiques qui se déroulent pendant la phase diastolique, permettant d'indexer le SSRT.

Ce résultat du renforcement de l'activité parasympathique renforce les résultats des travaux de Johnsen, Thayer et al. (2003) qui ont examiné les réponses inhibitrices dans un paradigme de Stroop. Ils ont montré que les TRs les plus rapides étaient associés à une VFC élevée. Johnsen, Thayer et al. (2003) ont également soutenu l'idée que la VFC à médiation vagale était associée à une régulation attentionnelle efficace et à une plus grande capacité à inhiber des réponses inappropriées. De plus, selon le modèle d'intégration neuroviséral de Thayer et al (2009), le contrôle par la composante parasympathique de la fonction cardiovasculaire était associé à ces processus inhibiteurs.

De plus, d'autres études ont démontré que l'activité cardiaque à médiation vagale (parasympathique) était associée à une efficacité attentionnelle reflétant une adaptation fonctionnelle de l'organisme à de nouveaux stimuli favorisant l'inhibition de réponses inappropriées et prématurées, facilitant ainsi une réponse rapide et efficace (e.g Sokolov., 1963 ; Porges., 1992 ; Chase, Graham & Graham., 1996 ; Connor & Lang., 1969 ; Graham & Clifton., 1966. Elliott., 1969).

1.22 CONCLUSION

Les résultats de la mesure de l'inhibition motrice élargissent les connaissances par rapport à la relation entre le SNA et le contrôle des fonctions exécutives. Nous démontrons une meilleure inhibition de réponse pendant la phase diastolique qui correspond à la phase de relâchement des oreillettes et des ventricules cardiaques, précédant la phase de dépolarisation (ondes QRS de l'ECG) et de repolarisation (onde T) ventriculaires, i.e., la phase systolique. L'association entre l'inhibition motrice et la diastole cardiaque était indexée par la variabilité de la fréquence cardiaque.

Nous montrons après EM que l'indice statistique parasympathique RMSSD augmentait significativement et que la composante sympathique SCR était significativement diminuée. Ce résultat montre pour la première fois que les participants avec une VFC plus élevée (RMSSD) et une conductance diminuée étaient plus susceptibles de montrer une meilleure inhibition de réponse motrice (SSRT plus court et SSD plus long) pendant la phase cardiaque diastolique.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans la première partie de la thèse, nous avons séparé les deux types d'alerte et nous avons confirmé que l'alerte exogène ne contribuait pas explicitement à la préparation temporelle. Il s'agit d'un mécanisme involontaire, rapide et non réfléchi qui sollicite principalement le système nerveux sympathique. En plus, pour la première fois, nous démontrons le phénomène de préparation temporelle endogène par l'activité du SNA. Nous avons établi un rapport de prédiction entre l'équilibre sympathovagal et une performance cognitive en termes de rapidité et de précision de la réponse motrice. Nous avons proposé de développer une méthode issue de l'intelligence artificielle pour évaluer le compromis vitesse-précision des réponses motrices.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons montré que l'entraînement attentionnel renforçait l'inhibition motrice. Pour la première fois, nous avons établi une relation entre la composante temporelle parasympathique RMSSD de la VFC et la composante SSRT de l'inhibition motrice. Les résultats de l'étude d'inhibition motrice rejoignent ceux de la tâche d'alerte sur la préparation temporelle et confirment ainsi le rôle de l'entraînement mental dans l'amélioration de la réponse motrice : les TRs de la tâche d'alerte et le SSRT de la tâche stop signal (correspondant aux temps de réaction mesurés pendant la période de contrôle de l'inhibition) mettent en évidence l'importance de l'activité sympathique et parasympathique du SNA dans la compréhension des mécanismes cognitifs de l'attention et des fonctions exécutives.

LIMITES DE L'ETUDE

Dans la présente recherche, deux méthodes d'analyse la VFC ont été utilisées : une méthode d'analyse spectrale du signal qui a permis d'extraire deux composantes fréquentielles : une composante basse fréquence LF et une composante haute fréquence HF ; une méthode d'analyse temporelle du signal correspondant au calcul du RMSSD (racine carrée des différences au carré des intervalles R-R successifs) (Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology., 1996 ; Berntson et al., 1997, 1998, 1990 ; Malliani, 1991). Cependant, notre méthodologie connaît certaines limites.

Premièrement, nous avons utilisé la LF comme indicateur de l'activité sympathique. Néanmoins, dans la littérature, certaines études considèrent que la LF résulte de l'influence des deux systèmes sympathique et parasympathique (Pomeranz et al., 1985).

Deuxièmement, nous avons utilisé la HF et le RMSSD comme indicateurs de l'activité parasympathique. Certes, ces deux index sont connus de la littérature pour fournir des résultats similaires. Cependant, Malik et Camen (1993) et Buchheit (2014) considèrent que ces deux indices ne reflètent pas le même degré d'activité parasympathique. En effet, l'activité cardiaque parasympathique se manifeste par des impulsions vagales efférentes très courtes et rapides, ces impulsions doivent être davantage rapprochées du RMSSD que de la composante HF, (Cerati et Schwartz., 1991 ; Kevy et al., 1993). En effet, le RMSSD serait moins sensible à la fréquence respiratoire et au bruit du signal ECG ; ce paramètre indiquerait les fluctuations périodiques du SNA (Buchheit., 2014). Tandis que, la composante HF correspondrait à la régulation de l'activité vagale en lien avec la respiration et les modulations de l'activité efférente vagale provoquant des altérations à court terme du rythme sinusal (Malik et Camen., 1993).

PERSPECTIVES

Nous décrivons les résultats de la présente recherche comme un apport supplémentaire et complémentaire qui permettrait d'enrichir les modèles cognitifs qui souhaitent modéliser le phénomène de préparation temporelle d'un point de vue neurobiologique, notamment avec l'apport d'indicateurs neurophysiologiques du SNA. Plus spécifiquement, nous proposons que nos résultats sur les mécanismes neurophysiologiques de la préparation temporelle viennent enrichir le modèle de la théorie des traces multiples développé par Los, Kruijne et al. (2014) qui supposent que la préparation temporelle dans une tâche de TR soit guidée par des traces mnésiques. Ces traces mnésiques seraient formées par une dynamique d'activité inhibitrice et excitatrice qui se produit pendant l'intervalle temporel FP. C'est-à-dire que, durant la FP, l'activité motrice serait inhibée pour éviter les réponses prématurées, et serait suivies d'une activation motrice quand la cible se présente. Le rapport « inhibition/excitation » serait stocké sous forme de traces qui accéderaient à la mémoire de travail. Ainsi, les participants seraient mieux préparés et répondraient plus rapidement lorsque la cible est présentée à un moment principalement associé à l'activation des essais précédents et proches dans le temps (récence de l'événement).

Aussi, à partir de nos résultats de la préparation temporelle, nous supposons que l'inhibition serait sollicitée pour empêcher le participant d'appuyer avant l'arrivée de la cible (anticipation). Cependant, cette suggestion reste à confirmer par la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Il serait en effet intéressant d'explorer en neuroimagerie l'activité cérébrale pendant l'intervalle de préparation temporelle FP et d'étudier de plus près le rapport inhibition/activation ainsi que les régions cérébrales impliquées. Il serait également intéressant d'étudier les régions cérébrales modulées par les voies sympathiques et vagues du SNA pendant la tâche d'alerte.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akman B, Noma A, Trautwein W. Acetylcholine activation of single muscarinic K⁺ channels in isolated pacemaker cells of the mammalian heart. *Nature*. 1983 ;303:250-253.
- Akselrod, S., et al. (1981). "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control." *Science* 213(4504): 220-222.
- Alderman, B. L., Olson, R. L., & Mattina, D. M. (2014). Cognitive function during low-intensity walking: A test of the treadmill workstation. *Journal of physical activity and health*, 11(4), 752-758.
- Amihai, I. and M. Kozhevnikov (2015). "The influence of Buddhist meditation traditions on the autonomic system and attention." *BioMed research international* 2015.
- Anderson, J. R., Reder, L. M., & Lebiere, C. (1996). Working memory: Activation limitations
- Azevedo, R. (2009). "Theoretical, conceptual, methodological, and instructional issues in research on metacognition and self-regulated learning: A discussion." *Metacognition and Learning* 4(1): 87-95.
- Azzalini, D., et al. (2019). "Visceral signals shape brain dynamics and cognition." *Trends in cognitive sciences* 23(6): 488-509.
- Backs, R. W., & Ryan, A. M. (1992, October). Multimodal measures of mental workload during dual-task performance: energetic demands of cognitive processes. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting (Vol. 36, No. 18, pp. 1413-1417)*. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation* (pp. 647–667). New York: Academic Press.
- Baker, E. and F. Lui (2021). Neuroanatomy, Vagal Nerve Nuclei. StatPearls [Internet], StatPearls Publishing.
- Bard, P. (1929). The central representation of the sympathetic system: as indicated by certain physiologic observations. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 22(2), 230-246.
- Bargh, J. A. (1997). "Reply to the commentaries." See Wyer 10: 231-246.
- Beissner, F., et al. (2013). "The autonomic brain: an activation likelihood estimation meta-analysis for central processing of autonomic function." *Journal of Neuroscience* 33(25): 10503-10511.
- Bernardi, L., Salvucci, F., Suardi, R., Soldá, P. L., Calciati, A., Perlini, S., ... &

- Ricciardi, L. (1990). Evidence for an intrinsic mechanism regulating heart rate variability in the transplanted and the intact heart during submaximal dynamic exercise. *Cardiovascular research*, 24(12), 969-981.
- Berntson G. G., Bigger T. J., Eckberg D. L., Grossman P., Kaufmann P. G., Malik M., et al., Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34 (1997), 623–648.
- Berntson G. G., Quigley K. S., Jang J., and Boysen S. T., An approach to artifact identification: Application to heart period data. *Psychophysiology*, 27 (1990), 586–598.
- Berntson G. G., Stowell JR, ECG artifacts and heart period variability: Don't miss a beat. *Psychophysiology*, 35 (1998), 127–132. Cambridge University Press.
- Berridge, C. W. and B. D. Waterhouse (2003). "The locus coeruleus–noradrenergic system: modulation of behavioral state and state-dependent cognitive processes." *Brain Research Reviews* 42(1): 33-84.
- Birren, J. E., Cardon, P. V. Jr. & Phillips, S. L. Reaction time as a function of the cardiac cycle in young adults. *Science* 140, 195–196 (1963)
- Boucher, L., et al. (2007). "Inhibitory control in mind and brain: an interactive race model of countermanding saccades." *Psychological review* 114(2): 376.
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity*, Springer Science & Business Media.
- Brunia, C. H. M., De Jong, B. M., Van Den Berg-Lenssen, M. M. C., & Paans, A. M. J. (2000). Visual feedback about time estimation is related to a right hemisphere activation measured by PET. *Experimental Brain Research*, 130(3), 328–337.
- Cacioppo, J. T., et al. (2007). *Handbook of psychophysiology*, Cambridge university press.
- Capizzi, M., et al. (2015). "Foreperiod priming in temporal preparation: testing current models of sequential effects." *Cognition* 134: 39-49.
- Case, R., Kurland, M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386–404.
- Cerati D, Schwartz PJ. Single cardiac vagal fiber activity, acute myocardial ischemia, and risk for sudden death. *Circ Res* 1991; 69: 1389-1401.
- Chang, C., et al. (2013). "Association between heart rate variability and fluctuations in resting-state functional connectivity." *Neuroimage* 68: 93-104.

- Chang, C., Metzger, C. D., Glover, G. H., Duyn, J. H., Heinze, H. J., & Walter, M. (2013). Association between heart rate variability and fluctuations in resting-state functional connectivity. *Neuroimage*, 68, 93-104.
- CHASE, W. G., GRAHAM, F. K., and GRAHAM, D. T. (1968) Components of HR response in anticipation of reaction time and exercise tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 76, 642-648.
- Cohn, J., Squire, P., Estabrooke, I., & O'Neill, E. (2013, July). Enhancing intuitive decision making through implicit learning. In *International Conference on Augmented Cognition* (pp. 401-409). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Connor, C. E., Egeth, H. E., & Yantis, S. (2004). Visual attention: bottom-up versus top-down. *Current biology*, 14(19), R850-R852.
- Connor, W. H., and LANG, P. J. (1969) Cortical slow-wave and cardiac-rate responses in stimulus orientation and RT conditions. *Journal of Experimental Psychology*, 82, 310-320.
- Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1994). Working memory and retrieval: A resource-dependent inhibition model. *Journal of Experimental Psychology: General*, 4, 354-373.
- Coull, J., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science*, 303, 1506-1508.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1999). An embedded-process model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Craig, A. D. How do you feel—now? The anterior insula and human awareness. *Nat Rev Neurosci* 10, 59-70, <https://doi.org/10.1038/nrn2555> (2009).
- Critchley, H. D. (2002). "Electrodermal responses: what happens in the brain." *The Neuroscientist* 8(2): 132-142.
- Critchley, H. D. Neural mechanisms of autonomic, affective, and cognitive integration. *J Comp Neurol* 493, 154-166.
- Critchley, H. D., et al. (2004). "Neural systems supporting interoceptive awareness." *Nature neuroscience* 7(2): 189.
- Daly, S., et al. (2020). "Temporal deployment of attention by mental training: an

- fMRI study." *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 20(4): 669-683.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450–466.
- Dawson, M. E., et al. (2017). "The electrodermal system."
- Decety, J. (1996). "The neurophysiological basis of motor imagery." *Behavioural brain research* 77(1-2): 45-52.
- Desimone, R. and J. Duncan (1995). "Neural mechanisms of selective visual attention." *Annual review of neuroscience* 18(1): 193-222.
- DiFrancesco D, Ferroni A, Mazzanti M, Tromba C. Properties of the hyperpolarizing-activated current (I_h) in cells isolated from the rabbit sino-atrial node. *J Physiol (Lond)*. 1986; 377:61-88.
- Eimer, M., Goschke, T., Schlaghecken, F., & Stürmer, B. (1996). Explicit and implicit learning of event sequences: evidence from event-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(4), 970.
- Elghozi, J. L. and C. Julien (2007). "Sympathetic control of short-term heart rate variability and its pharmacological modulation." *Fundamental & clinical pharmacology* 21(4): 337-347.
- Elithorn, A., & Lawrence, C. (1955). Central inhibition: Some refractory observations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 7, 116– 127.
- Elliott, R. (1969) Tonic heart rate: Experiments on the effects of collative variables lead to a hypothesis about its motivational significance. *Journal of Personality and Social Psychology*, 12, 211-228.
- Fibiger, W., & Singer, G. (1989). Biochemical assessment and differentiation of mental and physical effort. *Work & Stress*, 3(3), 237-247.
- Fisher, S. K. and S. Wonnacott (2012). *Acetylcholine. Basic neurochemistry*, Elsevier: 258-282.
- French, P.A., Runger, D.: *Implicit Learning. Current Directions in Psychological Science* 12, 13–18 (2003)
- Frens, M. A., et al. (1995). "Spatial and temporal factors determine auditory-visual interactions in human saccadic eye movements." *Perception & psychophysics* 57(6): 802-816.
- Garfinkel, S. N. & Critchley, H. D. *Threat and the Body: How the Heart*

- Supports Fear Processing. *Trends Cogn Sci* 20, 34–46, <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.10.005> (2016).
- Garfinkel, S. N. et al. Fear from the heart: sensitivity to fear stimuli depends on individual heartbeats. *J Neurosci* 34, 6573–6582, <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3507-13.2014> (2014)
- Garfinkel, S. N., Barrett, A. B., Minati, L., Dolan, R. J., Seth, A. K., & Critchley, H. D. (2013). What the heart forgets: Cardiac timing influences memory for words and is modulated by metacognition and interoceptive sensitivity. *Psychophysiology*, 50(6), 505-512
- Gaspar, P., Berger, B., Febvret, A., Vigny, A., & Henry, J. P. (1989). Catecholamine innervation of the human cerebral cortex as revealed by comparative immunohistochemistry of tyrosine hydroxylase and dopamine-beta-hydroxylase. *Journal of Comparative Neurology*, 279(2), 249-271.
- Gianaros, F. M. Van der Veen, and J. R. Jennings, “Regional cerebral blood flow correlates with heart period and high-frequency heart period variability during working-memory tasks: Implications for the cortical and subcortical regulation of cardiac autonomic activity,” *Psychophysiology*, vol. 41, no. 4, pp. 521–530, 2004.
- Gil-Gómez de Liaño, B., Stablum, F., & Umiltà, C. (2016). Can concurrent memory load reduce distraction? A replication study and beyond. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(1), e1–e12. <http://dx.doi.org/10.1037/xge0000131>
- Grabenhorst, M., Michalareas, G., Maloney, L. T., & Poeppel, D. (2019). The anticipation of events in time. *Nature communications*, 10(1), 1-13.
- Graham, F.K., and Clifton, R. K. (1966) Heart-rate change as a component of the orienting response. *Psychological Bulletin*, 6·5, 305-320.
- Grossman, P., et al. (1990). "A comparison of three quantification methods for estimation of respiratory sinus arrhythmia." *Psychophysiology* 27(6): 702-714.
- Hackley, S. A. and F. Valle-Inclán (2003). "Which stages of processing are speeded by a warning
- Hackley, S. A., et al. (2009). "Separation of phasic arousal and expectancy effects in a speeded reaction time task via fMRI." *Psychophysiology* 46(1): 163-171.
- Hackley, S. A., Langner, R., Rolke, B., Erb, M., Grodd, W., & Ulrich, R. (2009). Separation of phasic arousal and expectancy effects in a speeded reaction time task via fMRI. *Psychophysiology*, 46(1), 163–171.

- Hansen, A. L., et al. (2003). "Vagal influence on working memory and attention." *International Journal of Psychophysiology* 48(3): 263-274.
- Harnishfeger K. 1995. Development of cognitive inhibition. In: Dempster F, Brainerd editors. *Interference and inhibition in cognition*. San Diego: Academic. p 175–204
- Harrington, D., Haaland, K., & Knight, R. (1998). Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *The Journal of Neuroscience*, 18, 1085–1095.
- Hintzman, D. L. (1986). "' Schema abstraction" in a multiple-trace memory model." *Psychological review* 93(4): 411.
- Hintzman, D. L., Summers, J. J., Eki, N. T., & Moore, M. D. (1975). Voluntary attention and the spacing effect. *Memory & Cognition*, 3, 576–580. doi:10.3758/BF03197533
- Holzman J B and Bridgett D J 2017 Heart rate variability indices as bio-markers of top-down self-regulatory mechanisms: a meta-analytic review *Neurosci. Biobehav. Rev.* 74 233–55
- Huether G. The central adaptation syndrome: psychosocial stress as a trigger for adaptive modifications of brain structure and brain function. *Prog Neurobiol.* 1996; 48:569–612.
- Irisawa H, Brown HF, Giles WR. Cardiac pacemaking in the sinoatrial node. *Physiol Rev.*1993; 73:197-227
- Irisawa H, Giles WR. Sinus and atrioventricular node cells: cellular electrophysiology. In: Zipes DP, Jalife J, eds. *Cardiac Electrophysiology: From Cell to Bedside*. Philadelphia, Pa: WB Saunders Co; 1990:95-102.
- Jackson, P. L., et al. (2001). "Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation." *Archives of physical medicine and rehabilitation* 82(8): 1133-1141.
- Jeannerod, M. (1994). "The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery." *Behavioral and Brain sciences* 17(2): 187-202.
- Jeannerod, M. (1995). "Mental imagery in the motor context." *Neuropsychologia* 33(11): 1419-1432.
- Jennings, J. R. & Wood, C. C. Cardiac cycle time effects on performance, phasic cardiac responses, and their intercorrelation in choice reaction time. *Psychophysiology* 14, 297–307 (1977).
- Johannsen, P., Jakobsen, J., Bruhn, P., Hansen, S. B., Gee, A., Stødkilde-

- Jørgensen, H., & Gjedde, A. (1997). Cortical sites of sustained and divided attention in normal elderly humans. *NeuroImage*.
- Johnsen, B. H., et al. (2003). "Attentional and physiological characteristics of patients with dental anxiety." *Journal of anxiety disorders* 17(1): 75-87.
- Johnsen, B.H., Laberg, J.C., Eid, J., Hugdahl, K., 2002 Dichotic listening and sleep deprivation: vigilance effects. *Scand. J. Psychol.* 43, 413–417.
- Jones, B. E. (2003). [Frontiers in Bioscience 8, s438-451, May 1, 2003] arousal systems Barbara E. Jones. *Social Biology*.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kahneman, D., Tursky, B., Shapiro, D., & Crider, A. (1969). Pupillary, heart rate, and skin resistance changes during a mental task. *Journal of experimental psychology*, 79(1p1), 164.
- Kalsbeek, J. and R. Sykes (1967). "Objective measurement of mental load." *Acta psychologica* 27: 253-261.
- Kevy MN, Yang T, Wallick DW. Assessment of beat-by-beat control of heart rate by the autonomic nervous system: molecular biological techniques are necessary, but not sufficient. *Cardiovasc. Electrophysiol* 1993;4:83-193.
- Kiesel, A., Miller, J., & Ulrich, R. (2007). Systematic biases and Type I error accumulation in tests of the race model inequality. *Behavior Research Methods*.
- Kimble, G. A. (1961). "Hilgard and Marquis" *Conditioning and learning*.
- Kumral, D., et al. (2019). "The age-dependent relationship between resting heart rate variability and functional brain connectivity." *Neuroimage* 185: 521-533.
- Lacey, J. I. (1967). "Somatic response patterning and stress: Some revisions of activation theory." *Psychological stress: Issues in research*: 14-37.
- Lappin, J. S. and C. W. Eriksen (1966). "Use of a delayed signal to stop a visual reaction-time response." *Journal of experimental psychology* 72(6): 805.
- Lavie, N., Hirst, A., De Fockert, J. W., & Viding, E. (2004). Load theory of selective attention and cognitive control. *Journal of experimental psychology: General*, 133(3), 339.
- Lawrence, M. A. and R. M. Klein (2013). "Isolating exogenous and endogenous

- modes of temporal attention." *Journal of Experimental Psychology: General* 142(2): 560.
- Lee and B.-S. Liu, "Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements," *Aviation, space, and environmental medicine*, vol. 74, no. 10, pp. 1078–1084, 2003.
- Lewis, D. and J. Coote (1990). "Excitation and inhibition of rat sympathetic preganglionic neurones by catecholamines." *Brain research* 530(2): 229-234.
- Lieberman, M.D.: *Intuition: A social cognitive neuroscience approach*.
Psychological Bulletin 126(1), 109–137 (2000)
- Lieberman, M.D.: *Social cognitive neuroscience: A review of core processes*.
Annual Review of Psychology 58, 259–289 (2007) [SEP]
- Loewi, O. (1921). "Über humorale Übertragbarkeit der Herznervenwirkung." *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 189(1): 239-242.
- Logan, G. D., et al. (1984). "On the ability to inhibit simple and choice reaction time responses: a model and a method." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10(2): 276.
- Los, S. A. and C. E. Van Den Heuvel (2001). "Intentional and unintentional contributions to nonspecific preparation during reaction time foreperiods." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 27(2): 370.
- Los, S. A. and E. Van der Burg (2013). "Sound speeds vision through preparation, not integration." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 39(6): 1612.
- Los, S. A., et al. (2014). "Outlines of a multiple trace theory of temporal preparation." *Frontiers in Psychology* 5: 1058.
- Los, S. A., et al. (2017). "Hazard versus history: Temporal preparation is driven by past experience." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 43(1): 78.
- Lundberg U, Frankenhaeuser M: Pituitary-adrenal and sympathetic-adrenal correlates of distress and effort. *J Psychosom Res* 1980, 24(3- 4):125-130.
- Malliani, A., et al. (1991). "Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain." *Circulation* 84(2): 482-492.
- McCormick, C., et al. (2019). "On the selection of endogenous and exogenous signals." *Royal Society open science* 6(11): 190134.

- McCorry, L. K. (2007). "Physiology of the autonomic nervous system."
American journal of pharmaceutical education 71(4).
- Medimorec, S., Milin, P., & Divjak, D. (2021). Working memory affects
anticipatory behavior during implicit pattern learning. *Psychological Research*, 85(1),
291-301.
- Niemi, P. and R. Näätänen (1981). "Foreperiod and simple reaction time."
Psychological bulletin 89(1):
- Nobre, A. C., et al. (2007). "The hazards of time." *Current opinion in
neurobiology* 17(4): 465-470.
- Noma A, Trautwein W. Relaxation of the ACh-induced potassium current in the
rabbit sinoatrial node cell. *Pflugers Arch.* 1978; 377:193-200
- Nyklíček, I., et al. (1997). "Cardiorespiratory differentiation of musically-
induced emotions." *Journal of Psychophysiology*.
- O'Hanlon, J. F. (1972). Heart rate variability: a new index of driver
alertness/fatigue (No. 720141). SAE Technical Paper.
- Osterrieder W, Noma A, Trautwein W. On the kinetics of the potassium channel
activated by acetylcholine in the S-A node of the rabbit heart. *Pflugers Arch.* 1980 ;386
:101-109.
- Pagani, M., et al. (1986). "Power spectral analysis of heart rate and arterial
pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man
and conscious dog." *Circulation research* 59(2): 178-193.
- Parasuraman, R. (1987). Human-computer monitoring. *Human Factors*, 29(6),
695-706
- Parasuraman, R., Warm, J.S., Dember, W., 1987. Vigilance: taxonomy and
development. In: Mark, L.S., Warm, J.S., Huston, R.L. (Eds.), *Ergonomics and
Human Factors: Recent Research*. Springer, New York, pp. 11–32.
- Park, G., & Thayer, J. F. (2014). From the heart to the mind: cardiac vagal tone
modulates top-down and bottom-up visual perception and attention to
emotional stimuli. *Frontiers in psychology*, 5, 278.
- Périn, B., et al. (2010). "Alertness in young healthy subjects: an fMRI study of
brain region interactivity enhanced by a warning signal." *Brain and cognition* 72(2):
271-281.
- Perruchet, P., & Nicolas, S. (1998). L'apprentissage implicite : un débat
théorique. *Psychologie française*, 43, 13-26.

- Petersen and M. I. Posner, "The attention system of the human brain: 20 years after," *Annual Review of Neuroscience*, vol. 35, pp. 73–89, 2012.
- Pomeranz B, MacAulay RJB, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, Kilborn KM, Barger AC, Shannon DC, Cohen RI, Benson H. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol* 1985;248: H151-HIS3.
- Porges, S. W. (1992). "Autonomic regulation and attention." *Attention and information processing in infants and adults*: 201-
- Porges, S. W. (2009). "The polyvagal theory: new insights into adaptive reactions of the autonomic nervous system." *Cleveland Clinic journal of medicine* 76(Suppl 2): S86.
- Porges, S. W. and D. C. Raskin (1969). "Respiratory and heart rate components of attention." *Journal of experimental psychology* 81(3): 497.
- Posner, M. I. (1975). "Psychobiology of attention." *Handbook of psychobiology*: 441-480.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind*, Lawrence Erlbaum.
- Posner, M. I. and S. E. Petersen (1990). "The attention system of the human brain." *Annual review of neuroscience* 13(1): 25-42.
- Posner, M. I. and S. J. Boies (1971). "Components of attention." *Psychological review* 78(5): 391.
- Posner, M. I., et al. (1982). "Neural systems control of spatial orienting." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 298(1089): 187-198.
- Posner, M. I., Klein, R., Summers, J., & Buggie, S. (1973). On the selection of signals. *Memory & cognition*, 1(1), 2-12.
- Posner, Michael I, & DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. In *The attentive brain*.
- Rae, C. L., Botan, V. E., Gould Van Praag, C. D., Herman, A. M., Nyssönen, J. A. K., Watson, D. R., Duka, T., Garfinkel, S. N., & Critchley, H. D. (2018). Response inhibition on the stop signal task improves during cardiac contraction. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.
- Raymond J, Shapiro K, Arnell K. Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink? *Journal of Experimental Psychology*. 1992;18(3):849–860.

- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 219–235.
- Robbins M A, Elias M F, Elias P K and Budge M M 2005 Blood pressure and cognitive function in an African–American and a Caucasian–American sample: the Maine-Syracuse Study *Psychosom. Med.* 67 707–14
- Robinson, R. G., & Coyle, J. T. (1980). The differential effect of right versus left hemispheric cerebral infarction on catecholamines and behavior in the rat. *Brain Research*.
- Rubia, K., Smith, A., Brammer, M., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *NeuroImage*, 20, 351–358.
- Saboul, D., et al. (2013). "The impact of breathing on HRV measurements: Implications for the longitudinal follow-up of athletes." *European journal of sport science* 13(5): 534-542.
- Salet, J. M., et al. (2022). "FMTP: A unifying computational framework of temporal preparation across time scales." *Psychological review*.
- Samuels, E. R. and E. Szabadi (2008). "Functional neuroanatomy of the noradrenergic locus coeruleus: its roles in the regulation of arousal and autonomic function part I: principles of functional organisation." *Current neuropharmacology* 6(3): 235-253.
- Scerbo, A. S., et al. (1992). "A major effect of recording site on measurement of electrodermal activity." *Psychophysiology* 29(2): 241-246.
- Schmitt L, Regnard J, Millet GP Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Front Physiol* 2015; 6:343.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- Singer, T., & Lamm, C. (2009). The social neuroscience of empathy. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Smit AS, Eling PA, Coenen AM: Mental effort affects vigilance enduringly: after effects in EEG and behavior. *IntJPsychophysiol*2004, 53(3):239-243.
- Sørensen, L., et al. (2019). "A psychophysiological investigation of the interplay between orienting and executive control during stimulus conflict: A heart rate variability study." *Physiology & behavior* 211: 112657.
- Stahl, J., & Rammsayer, T. H. (2005). Accessory stimulation in the time course

- of visuomotor information processing: Stimulus intensity effects on reaction time and response force. *Acta Psychologica*
- Sternberg, R. J., Forsythe, G. B., Hedlund, J., Horvath, J. A., Wagner, R. K., Williams, W. M., et al. (2000). *Practical intelligence in everyday life*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Sternberg, S., 1969. The discovery of processing stages: extensions of Donder's method, in: Koster, W.G. (Ed.), *Attention and Performance II*. North-Holland, Amsterdam, pp. 276–315.
- Sturm, W., De Simone, A., Krause, B. J., Specht, K., Hesselmann, V., Radermacher, I., ... Willmes, K. (1999). Functional anatomy of intrinsic alertness: Evidence for a fronto- parietal-thalamic-brainstem network in the right hemisphere. *Neuropsychologia*, 37(7), 797–805.
- Sturm, W., et al. (1999). "Functional anatomy of intrinsic alertness: evidence for a fronto-parietal-thalamic-brainstem network in the right hemisphere." *Neuropsychologia* 37(7): 797-805.
- Sutterlin S, Herbert C, Schmitt M, Kubler A and Vogele C 2011 Overcoming selfishness: reciprocity, inhibition, and cardiac-autonomic control in the ultimatum game *Frontiers Psychol.* 2 173
- Sved AF, Cano G, Card JP. Neuroanatomical specificity of the circuits controlling sympathetic outflow to different targets. *Clin Exp Pharmacol Physiol.* 2001; 28:115–119.
- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, 10(3), 251-296.
- Tarchanoff, G. (1890). About galvanic skin (Rae, Botan et al. 2018) response from the excitation of sensorial organs and different psychic activities. *Pflügers Arch. Eur. J. Physiol.* 46, 46–55.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiologic interpretation, and clinical use. *Circulation* 1996; 93: 1043-1065. *Intern. Med.* 118, 436-447.
- Thayer, J. F. and R. D. Lane (2000). "A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation." *Journal of affective disorders* 61(3): 201-216.
- Thayer, J. F., et al. (2009). "Age-related differences in prefrontal control of heart

- rate in humans: A pharmacological blockade study." *International Journal of Psychophysiology* 72(1): 81-88.
- Thayer, J. F., et al. (2012). "A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health." *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 36(2): 747-756.
- Theeuwes, J. (1991) Exogenous and Endogenous Control of Attention: the Effect of Visual Onsets and Offsets. *Percept. Psychophys.* 49, 83–90
- Tian, Y., Liang, S., & Yao, D. (2014). Attentional orienting and response inhibition: insights from spatial-temporal neuroimaging. *Neuroscience bulletin*, 30(1), 141-152.
- Towse, J. N., & Hitch, G. J. (1995). Is there a relationship between task demand and storage space in tests of working memory capacity? *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 48, 108–124.
- Treisman, A. M. and G. Gelade (1980). "A feature-integration theory of attention." *Cognitive psychology* 12(1): 97-136.
- Trillenberg, P., et al. (2000). "CNV and temporal uncertainty with 'ageing' and 'non-ageing' S1–S2 intervals." *Clinical neurophysiology* 111(7): 1216-1226.
- Unnerstall, J. R., et al. (1984). "Distribution of α_2 agonist binding sites in the rat and human central nervous system: analysis of some functional, anatomic correlates of the pharmacologic effects of clonidine and related adrenergic agents." *Brain Research Reviews* 7(1): 69-101.
- Vallesi, A. and T. Shallice (2007). "Developmental dissociations of preparation over time: deconstructing the variable foreperiod phenomena." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 33(6): 1377.
- Van der Burg, E. et al. (2008) Pip and Pop: Nonspatial Auditory Signals Improve Spatial Visual Search. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 34, 1053–1065
- Van Roon, A. M., et al. (2004). "Introducing a baroreflex model for studying cardiovascular effects of mental workload." *Psychophysiology* 41(6): 961-981.
- Vince, M. A. (1948). "The intermittency of control movements and the psychological refractory period." *British Journal of Psychology* 38(3): 149.
- Williams D P, Cash C, Rankin C, Bernardi A, Koenig J and Thayer J F 2015

- Resting heart rate variability predicts self-reported difficulties in emotion regulation: a focus on different facets of emotion regulation *Frontiers Psychol.* 6 261
- Williams D P, Thayer J F and Koenig J 2016 Resting cardiac vagal tone predicts intraindividual reaction time variability during an attention task in a sample of young and healthy adults *Psychophysiology* 53 1843–51
- Williams, D. P., et al. (2016). "Resting cardiac vagal tone predicts intraindividual reaction time variability during an attention task in a sample of young and healthy adults." *Psychophysiology* 53(12): 1843-1851.
- Woodrow, H. (1914). "The measurement of attention." *The psychological monographs* 17(5): i.
- Yaici, E., et al. (2002). "Catecholaminergic projections onto spinal neurons destined to the pelvis including the penis in rat." *International journal of impotence research* 14(3): 151-166.



**Study of the mental training and autonomic nervous system
on cognitive and motor control within a temporal
preparation task**

Journal:	<i>Psychophysiology</i>
Manuscript ID	Draft
Wiley - Manuscript type:	Original Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Ezzedini, Souhir; Paris-Nanterre University, STAPS Ben Jebara, Sofia; University of Carthage Higher School of Communications of Tunis Abidi, Malek; Paris-Nanterre University de Marco, Giovanni; Paris-Nanterre University
Keywords:	Cognitive Control < Content/Topics, Learning < Content/Topics, Motor Control < Content/Topics, Heart Rate Variability < Methods, Skin Conductance < Methods
Abstract:	<p>The ability to selectively and rapidly allocate attentional resources in time and implement a cognitive and motor control is fundamental in proactive regulation of human behavior. Despite numerous works explaining the cognitive processes underlying the temporal preparation, very little works exist in the literature concerning the autonomic mechanisms involved jointly in cognitive and motor control in a task of temporal preparation. Evidences being missing, the present study seeks to deepen the temporal preparation phenomenon by the searching of biological markers of the autonomic nervous system (ANS) in relationship with the mental training of the attentional (foreperiods) and motor (force) control. Forty subjects, divided into mental training group (n = 20) and without mental training group (n = 20), have participated in this study. Behaviorally, only the MT group reinforced its attentional and motor control. The influence of the ANS on the cognitive-motor control was measured using the skin conductance response and the heart rate variability; the accuracy of the motor responses measured using a method derived from machine learning. After mental training, results showed, at short foreperiods (FPs) and high force level, a cognitive-motor control significantly decreased related to less accurate motor responses and a declining cognitive performance, significantly correlated with the sympathetic system; conversely, at long FPs and low force level, the attentional and motor control was significantly increased with more accurate motor responses, consistent with dominant parasympathetic component. Interestingly, we show a predictive relationship between the sympathovagal balance and the cognitive-motor performance during the temporal preparation task.</p>

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60



Impact Statement

Our study proposes an innovative framework for the analysis of temporal preparation of an action by controlling the cognitive and motor aspects of an alert task related to the autonomic nervous system and perceptual-motor learning.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23

Study of the mental training and autonomic nervous system on cognitive and motor control within a temporal preparation task

24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Souhir Ezzedini¹, Sofia Ben Jebara², Malek Abidi^{1,3} and Giovanni de Marco^{1,3}

¹Laboratoire LINP2, UPL, Université Paris Nanterre, F92000 Nanterre, France.

²Carthage University, Higher School of Communications of Tunis COSIM

Laboratory, Tunisia.

³COMUE Paris Lumières University.

Author notes

This work was supported by the Laboratory LINP2, UPL, Université Paris Nanterre, F92000 Nanterre, France. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest: The authors of this manuscript declare that they have no conflict of interest to disclose.

Correspondence concerning this article should be addressed to Souhir Ezzedini, Université Paris Nanterre, LINP2, 200 Avenue de la république 92000 Nanterre, France.

E-mail: souhirezzedini@icloud.com

Abstract

The ability to selectively and rapidly allocate attentional resources in time and implement a cognitive and motor control is fundamental in proactive regulation of human behavior. Despite numerous works explaining the cognitive processes underlying the temporal preparation, very little works exist in the literature concerning the autonomous mechanisms involved jointly in cognitive and motor control in a task of temporal preparation. Evidences being missing, the present study seeks to deepen the temporal preparation phenomenon by the searching of biological markers of the autonomic nervous system (ANS) in relationship with the mental training of the attentional (foreperiods) and motor (force) control. Forty subjects, divided into mental training group (n = 20) and without mental training group (n = 20), have participated in this study. Behaviorally, only the MT group reinforced its attentional and motor control. The influence of the ANS on the cognitive-motor control was measured using the skin conductance response and the heart rate variability; the accuracy of the motor responses measured using a method derived from machine learning. After mental training, results showed, at short foreperiods (FPs) and high force level, a cognitive-motor control significantly decreased related to less accurate motor responses and a declining cognitive performance, significantly correlated with the sympathetic system; conversely, at long FPs and low force level, the attentional and motor control was significantly increased with more accurate motor responses, consistent with dominant parasympathetic component. Interestingly, we show a predictive relationship between the sympathovagal balance and the cognitive-motor performance during the temporal preparation task.

Key words: temporal preparation, attention, motor, ANS, learning.

Introduction

The temporal preparation of an action is the allocation of human information processing resources over time (Nobre, 2001; Nobre et al., 2010). A precise temporal preparation is important because it facilitates stages of information processing across reaction time tasks (RT) (Nobre et al., 2010; Niemi & Näätänen, 1981). In addition, speed and accurate response require a volitional cognitive process impacting the human performance via endogenous and exogeneous mechanisms of attention (Lawrence and Klein., 2013). According to Lawrence and Klein (2013), a purely endogenous temporal alerting may be generated by a signal-target contingency, in which a genuine improvement in RT and accuracy of responding was predicted. Recently, McCormick and colleagues (2019) reproduced the experimental conditions of Lawrence and Klein (2013) but they didn't reproduce the expected performance in the endogenous condition, i.e., a decreased error rate. McCormick and colleagues (2019) suggest that the theory of speed-accuracy trade-off (SAT) in endogenous alertness should be explored under various methodological approaches to explain how the type of signal in the endogenous condition influences the cognitive effort and performance. The cognitive effort may be referred to the mental load that is imposed by the cognitive task; it classically based on working memory functioning which may be affected by the type of cognitive activity required (Sweller et al., 1998). Parasuraman (1987) suggested that the increase in working memory might decrease the perceptual sensitivity of the stimuli during a cognitive task. In simple RT tasks, Woodrow (1914) has postulated that the temporal preparation develops during foreperiod (FP), i.e., the time interval which separates the warning stimulus to the target stimulus. Since this experimental finding, FPs in RT tasks have been extensively studied to explain the phenomenon of temporal preparation during alerting tasks (; Sturm et al., 200; Coull et al., 2001; Périn et al.,

1
2
3 2010; Daly et al., 2020). Also, several experimental studies demonstrated consistent and strong
4 influences of FPs duration on cognitive processes within the context of the temporal preparation
5
6 (Los, Kruijne et al., 2014).
7
8
9

10
11 Unfortunately, the question of the neurophysiological mechanisms of the alerting task remains
12 unclear. One of the suspected underlying neurophysiological mechanisms, especially in the case
13 of alerting tasks, concerns the interaction of the sympathetic and parasympathetic components
14 of the ANS with the cognitive components of the central nervous system. As early as 1969,
15 Porges and Raskin demonstrated that the heart rate variability (HRV) was significantly
16 decreased during sustained attention. The relation between HRV and attention has also been
17 studied in children (Porges, 1972). Backs and Ryan (1992) manipulated the memory load and
18 a temporal interval in a task of sustained attention, and they found that vagal activity decreased
19 as attentional demand increased. Additionally, other authors have related the skin conductance
20 responses (SCRs), an index of the sympathetic system to attention in mental workload. Indeed,
21 Kahneman (1969) demonstrated that during a cognitive task in which we manipulate the mental
22 effort, the sympathetic response reflected by the SCRs would be correlated with the cognitive
23 load imposed by the task. On the basis of other evidence, Lacey (1967) has argued that
24 sympathetic component of ANS would indicate the sensitization of the organism to
25 environmental stimulations. Therefore, the sympathetic system would reinforce the autonomic
26 arousal to ensure an adaptation to the situations which require a rapid reaction (Cannon.,1914;
27 Critchley., 2002).
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49

50
51 Similarly, there is growing evidence for the role of vagal activity in cognitive performance. In
52 a more recent study, Hansen et al (2003) demonstrated that high vagal activity would be
53 associated with short RTs and less error rate. Likewise, Thayer and Lane (2000) proposed that
54 vagally-mediated HRV affects the ability of subject to allocate attentional resources to meet
55 environmental exigences. These authors demonstrated that high HRV represents a high degree
56
57
58
59
60

1
2
3 of neurovisceral integration in the organism and increases the ability to organize cognitive
4 resources in attentional tasks. Thus, increased attentional regulation and high HRV may be
5 linked to adaptive behavior. Porges (1992) demonstrated that the ability to regulate attentional
6 processes was related to an increased HRV mediated by the cardiac vagal control. This view
7 was further supported in the study of Thayer et al (2009) which showed that the increasing the
8 vagal excitation associated with better cognitive control in working memory and inhibitory
9 control tasks. Conversely, Forte et al (2019) supposed that a decline in vagal activity was
10 associated with lower cognitive performance.
11
12

13
14 In the present study, we propose to investigate the mechanisms of cognitive-motor control
15 within an endogenous alerting task (temporal preparation) by focusing on mental training and
16 the sympathetic and parasympathetic components of autonomic nervous system. We have
17 operationalized the temporal variables, the physical effort and the cognitive-motor control by
18 manipulating the FPs durations (short, long), the force levels (low, high) and the mental training
19 respectively. Additionally, we assume that MT group which reinforces its cognitive-motor
20 control, will increase its autonomic arousal state controlled by the ANS (Critchley., 2001;
21 Decety.,1996). As a result, we speculate that the association “high force-short FP” will increase
22 the sympathetic activity of the alerting process, leading to poorer cognitive performance; in
23 contrast, the trade-off “low force-long FP” will increase the parasympathetic activity of the
24 alerting process strengthening the temporal preparation and improving the cognitive
25 performance.
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51

52 **Methods**

53 **Participants**

54
55 Forty healthy participants (19 females and 21 males) aged between 20 and 35 years (mean =
56 26.92; standard deviation (SD) = 4.14) without psychiatric, neurological, or sensorimotor
57
58
59
60

1
2
3 disorders. All participants were right-handed. We compared two groups: a group named mental
4 training (MT) who did the mental training before the real physical task (n = 20), and a group
5 named without mental training (wMT) (n = 20) who did only the physical task. This protocol
6
7
8 was approved by the institutional research board of the CPP Ile-de-France.
9

16 **Experimental task**

20 The experimental task was constituted of 8 alternating alertness blocks composed of 21 trials
21 each: four blocks of endogenous alertness and four blocks of exogenous alertness. In
22 endogenous alertness, the trials were constructed from three FPs of 650, 680 and 710 ms and
23 three force levels (low, medium and high) varying randomly. In order to highlight the implicit
24 effect of the temporal preparation, we used an exogenous alert task as a control task which did
25 not require temporal cognition. In the present study, we have retained only two FPs, a short FP
26 (650) and a high FP (710), and two opposite force levels (low and high) in both groups (MT
27 and wMT). FPs and force levels were randomized. The FP interval separates the warning sound
28 stimulus (beep) from the target verbal stimulus (GO) to prepare temporally the participants to
29 response by squeezing the handgrip as quickly and as accurately as possible (Posner., 1973;
30 Lawrence and Klein., 2013). At the start of each block of 3 x 7 trials, an auditory instruction
31 was generated to precise required force level. Participants had to reach the force level values
32 by adjusting the needle of the gauge projected on the screen. The visual feedback (gauge) makes
33 it possible to produce an appropriate force level and to control the precision of the motor
34 response of the subjects.
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53

56 **Force task**

57
58
59
60

Participants sat comfortably in a chair, and they performed 3 trials of force reaching the voluntary maximal force (VMF) by squeezing on the handgrip during 2 second (s) maximum using right hand; the instruction that was given “squeeze the dynamometer as stronger as possible and release the pressure at the moment indicated by the experimenter”; each trail was followed by 30 s of rest. The VMF was determined by calculating the mean of the three consecutive trials and allowed to normalize the force levels of each participant at 20% (low force) and 80% (high force) of VMF. We asked participants to retain the 20% and 80% force values, each one converted into a numerical value on a gauge (figure 1). The purpose of using two opposite force levels was to modulate the mental and physical effort and the autonomic arousal states.

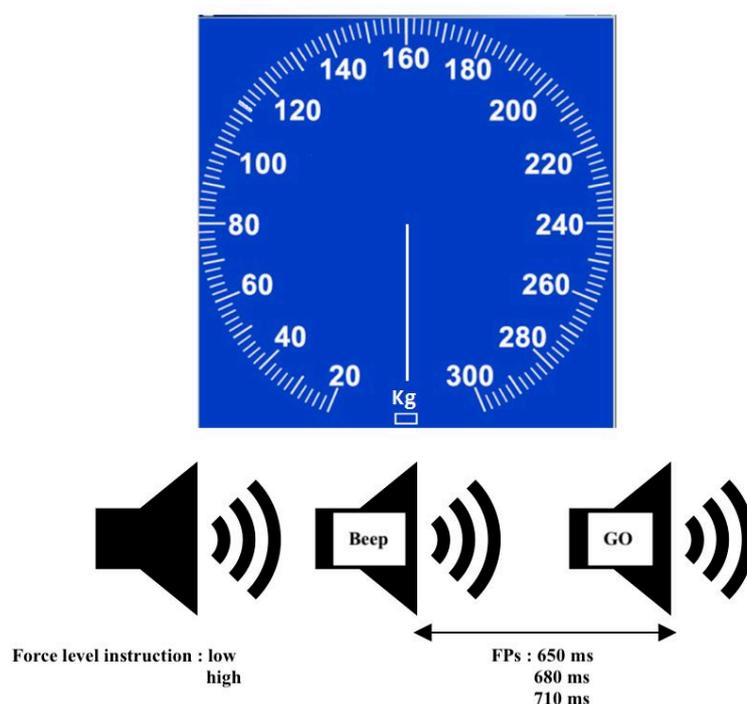


Figure 1. Experimental task: participants had to respond when they hear the target GO by squeezing the handgrip and positioning the needle of the gauge to the numerical value corresponding to 20 % (low) or 80% (high). The warning sound stimulus was transmitted during 50 ms and preceded the imperative stimulus with a varying FP.

Behavioral indices

Reaction time, Force measures and anticipation

Reaction time in millisecond (ms) and force in kilogram (kg) measures were recorded by E-prime (version 2.0.8.22) and Acqknowledge software ® (5.0.4) respectively. The auditory stimuli were programmed on E-prime and synchronized with Acqknowledge to appear as digital inputs in separate channels. The force was measured by an handgrip (TSD121B Hand Dynamometer) which was connected to Acqknowledge and the force signal acquisition was recorded in a separate channel. Force values corresponded to the peak of the force. RTs were extracted from the force signal. RTs were extracted for each trial and represent the interval duration between the target onset and the force amplitude onset. Anticipations were extracted from force and digital inputs signals representing all the fast responses (<100 ms) preceding the appearance of the verbal target (GO).

Respect of force levels

From a machine learning method, we measured the accuracy of subject's answers for the different FPs and force levels to verify the relationship between speed and accuracy of responses. Three criteria (detailed below) have been used to evaluate the precision of the requested forces level depending on FPs. The first one deals with the percentage of force level respect. The second deals with the aptitude to reach the required force while the third one quantifies the fluctuations around the realized force level.

First, to study the aptitude of the subjects to respect the force instructions, two force levels (low and high) are described through the normalized force percentage (NFP) and re-organized according to the realized force levels. A classification approach based on the method of “Radial Basis Function (RBF) Kernel Based Support Vector Machine” (Wang et al., 2004) was carried,

1
2
3 yielding to two real classes which are not effectively equal to those requested. A comparison
4
5 between requested level of force and the realized one was analyzed and expressed in term of
6
7 percentage of respected force level. Second, we study how the peak of the force is changing
8
9 according to the required task. The mean values of NFP are determined for each force level in
10
11 both groups of MT and wMT. A good precision is achieved when mean value of each class
12
13 (low, high) is close to recommended one (0.2, 0.8). Third, we calculated the standard deviations
14
15 (SD) of NFP for each force level in both groups MT and wMT. When the SD was low, i.e.,
16
17 close to the average value, then the accuracy of achieving the required force was considered in
18
19 line with the expected response.
20
21
22
23
24

25 **Neurophysiological markers**

26 **Skin conductance responses (SCRs)**

27
28
29
30 The SCRs signals have been used as tonic activity markers of sympathetic nervous system.
31
32 SCRs were recorded with the sensor positioned on the middle finger and the distal (first)
33
34 phalanges of the index of the non-dominant hand, using an electrodermal GEL101 to facilitate
35
36 the contact between the sensor and the skin. SCRs data were analyzed as described in the
37
38 AcqKnowledge software manual (SPR Ad Hoc Committee on Electrodermal Measures., 2012)
39
40 The criterion for the smallest acceptable SCR was set at 0.03 microsiemens. The SCRs were
41
42 recorded continuously and simultaneously during the experimental task using the biopac
43
44 MP160 system with the version 5.0.4 of AcqKnowledge ®.
45
46
47
48
49
50
51
52

53 **Respiration**

54
55
56 We have controlled respiration by paced breathing to remove any possibility of influencing the
57
58 HRV. We instructed the participants to breathe naturally during the task (Denver, Reed and
59
60

1
2
3 Porges., 2007). Respiration was recorded using pneumatic respiration transducer (TSD221).
4
5 Respiratory rate was extracted as described in the AcqKnowledge software manual (Ritz et al.,
6
7 2002; Grossman et al., 1990). The respiration signal was recorded continuously and
8
9 simultaneously during the experimental task using the biopac MP160 system with the version
10
11
12 5.0.4 of AcqKnowledge ®.

13 14 15 **Electrocardiogram (ECG)**

16
17
18 We have measured the heart rate variability (HRV) using EL500 series disposable electrodes.
19
20 The electrode positions have been applied according to the common Lead II configuration using
21
22 GEL 100 to facilitate the contact. We decomposed the HRV into two frequential components
23
24 using a spectral analysis: low frequencies (LF) and high frequencies (HF)As (Malliani et al.,
25
26 1991; Montano et al.,1994), we calculated the relative value of each component in proportion
27
28 to the total power. The ratio of LF over HF in normalized units provided a balanced index
29
30 allowing to control the behavior of the sympathetic and parasympathetic branches of the ANS
31
32 (Pagani et al., 1984; Malliani et al., 1991). In addition, the normalization allows to reduce the
33
34 impact of the changes in total power. LF component has a frequency range between 0.04-0.15
35
36 Hz, whereas HF component occurs at 0.15-0.4 Hz. LF/HF ratio was calculated as an index of
37
38 sympathovagal balance, resulting from the sympathetic and parasympathetic (vagal) pathways
39
40 of the ANS (Task Force of the European Society of Cardiology and The North American
41
42 Society of Pacing and Electrophysiology., 1996). The details of the calculations are described
43
44 in the AcqKnowledge software manual according to the international guidelines (Berntson et
45
46 al., 1997; Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society
47
48 of Pacing and Electrophysiology., 1996). The ECG signals were recorded continuously and
49
50 simultaneously during the experimental task using the biopac MP160 system with the version
51
52 5.0.4 of AcqKnowledge ®.
53
54
55
56
57
58
59
60

Statistical analysis

The Statistical analyses were performed using JASP ® version 0.16.4. The normality of the data distribution was determined with the Shapiro-Wilk Test and the equality of random and fixed variances was determined using the Levene's and sphericity tests. The Chi-Squared Contingency test allowed to verify the statistical significance of the percentages of force level respect determined during the machine learning classification method, examined for each FP and force level between the MT and without MT groups. A mixed-design ANOVA was applied to the behavioral data (RTs and anticipations) to control the within and between groups variance using three main factors: FPs (650 and 710), force levels (low and high) and attentional mental training (MT groups and without MT groups). When ANOVA indicated a significant main effect or interactions, a Bonferroni post-hoc test was applied ($p < 0.05$). Size effects were also reported as Partial eta squared (η^2). Also, for every independent variable, a Pearson's correlation was applied to study the relation between RTs and the sympathetic and parasympathetic components; finally, a linear regression analysis was applied to determine the prediction of sympathovagal balance on RTs.

Results

Behavioral indices

Reaction times (RTs)

First, RTs have been measured between both groups (MT and wMT) during the whole task without separating the different FP and force levels. ANOVA [MT group x wMT group] showed a significant interaction $F = 456.7$, $p < 0.001$ with a large effect size: partial $\eta^2 = 0.21$,

the MT group {mean = 307.08, SD = 56.9}; the 95% CI = [305.17; 308.99] and the WMT group {mean = 342.56, SD = 59.60}; the 95% CI = [340.56; 344.57]. Second, we have compared the force levels at FP 650 and 710, between both groups; we showed a significant interaction [Force level x FPs x Groups] $F = 122.03$ $p < .001$ with a medium effect size: partial $\eta^2 = 0.07$ (figure 2). Within MT group, at FP 650, Bonferroni Post-hoc comparisons showed a significant difference, $p < 0.001$ between the RTs at low force level {mean = 344.6, SD = 49.41}, 95% confidence interval (CI) = [341.29; 347.65] and high force level {mean = 323.80, SD = 49.78}; the 95% CI = [320.47; 327.14]. Within wMT group, at FP 650, no significant difference between the force levels was observed. Within MT group, at FP 710, Bonferroni Post-hoc comparisons showed a significant difference, $p < 0.001$ between low force level {mean = 268.3, SD = 547.68}, 95% CI = [265.07; 271.47] and high force level {mean = 291.6, SD = 48.29}, 95% CI = [288.39; 294.87]. Within wMT group, no significant difference between RTs at FP 710 and force levels were observed. And no significant difference between RTs in both groups (MT and wMT) was observed in exogenous alertness.

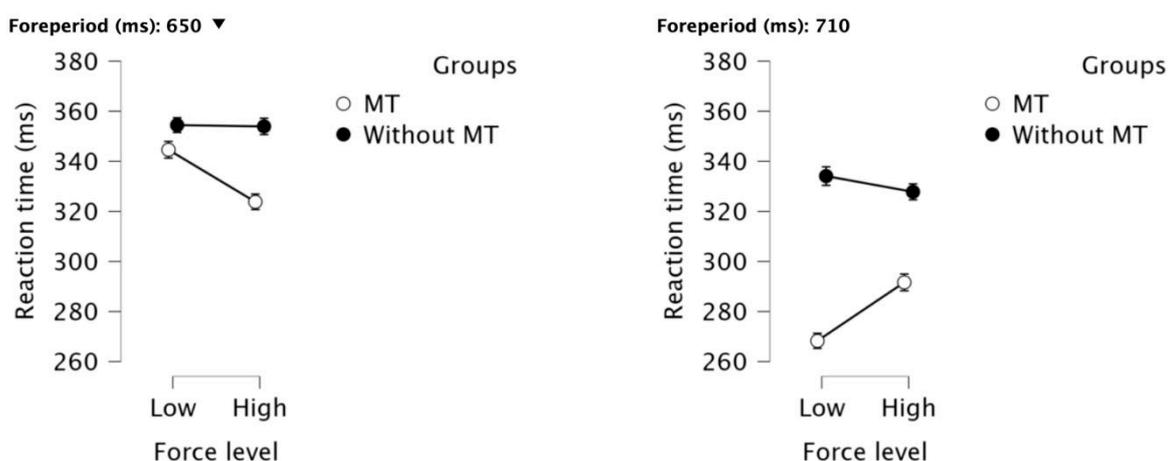


Figure 2. Results of ANOVA [Groups x Foreperiods x force levels].

Anticipations

First, anticipations have been measured between both groups (MT and wMT) during the whole task without separating the different FPs and force levels. ANOVA analysis showed a significant difference $F = 11.23$, $p < 0.001$ with a large effect size: partial $\eta^2 = 0.13$ the MT group {mean = 53.16, SD = 22.59}; the 95% CI = [50.42; 55.91] and the WMT group {mean = 61.4, SD = 24.34}; the 95% CI = [57.48; 65.33]. This result suggests that the subjects massively anticipated the target after mental training, regardless of PF and force levels. Second, a more detailed analysis of anticipations depending on FPs and force levels within the MT group was applied. Bonferroni Post-hoc comparisons showed a significant difference, $p < 0.001$ between FP 650 at high force level {mean = 43.84, SD = 18.99}, 95% (CI) = [42.25; 45.43] and FP 710 at low force level {mean = 65.43, SD = 20.96}; the 95% CI = [63.67; 67.18]. Regardless of PF and force levels, no significant difference was found in the wMT group.

Force level respect

At FP 710 and low force level, the percentage of respect of the force level was significantly increased between the MT group (99.4 %) and the wMT group (90.87 %) {Chi-Squared = 237.41, $p < 0.001$ }, reflecting in the MT group a higher accuracy of the force level requested. No significant difference was found at FP 710 and high force level between the two groups. Also, no significant difference was found between the groups at FP 650 regardless of the force levels.

Neurophysiological markers

Correlational analysis between sympathetic (LF, SCR)/parasympathetic (HF component) indices and RTs in MT group

We performed a correlational analysis to study the relationship between the ANS markers and the RTs. At FP 650 and for a high force level, the sympathetic component of ANS dominated within the MT group. The RTs were positively and significantly correlated with LF {Pearson's $r = 0.43$ $p < 0.001$ } and SCR activity {Pearson's $r = 0.51$ $p < 0.001$ } and negatively and weakly correlated with HF {Pearson's $r = -0.20$ $p < 0.001$ } (figure 3). No significant correlation was found between the ANS markers and RTs within the wMT group.

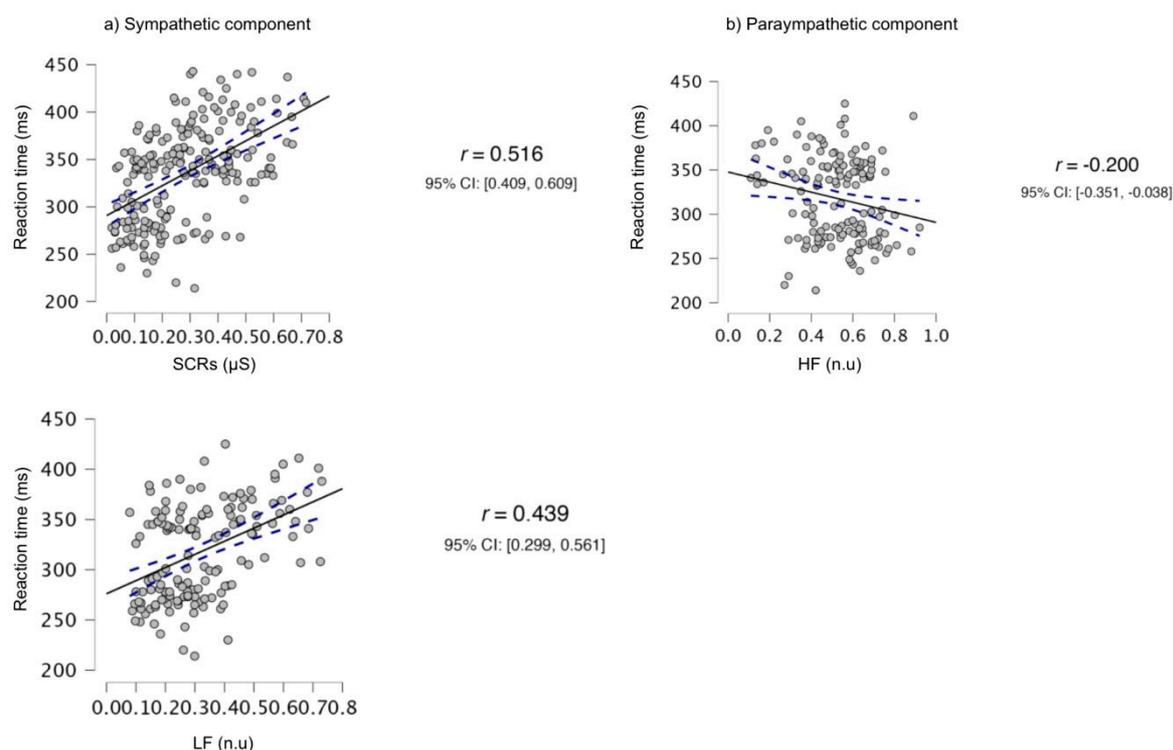


Figure 3. a) Correlation between LF and SCRs (sympathetic component) and reaction time and b) correlation between HF (parasympathetic component) and reaction time during FP 650 and high force level.

At FP 710 and for a low force level, the parasympathetic component of ANS dominated within the MT group. The RTs were positively and weakly correlated with LF {Pearson's $r = 0.30$ $p <$

0.001} and SCRs activity {Pearson's $r = 0.40$ $p < 0.001$ } and negatively and stronger correlated with HF {Pearson's $r = -0.56$ } $P < 0.001$ } (figure 4). No significant correlation was found between the ANS markers and RTs in the wMT group.

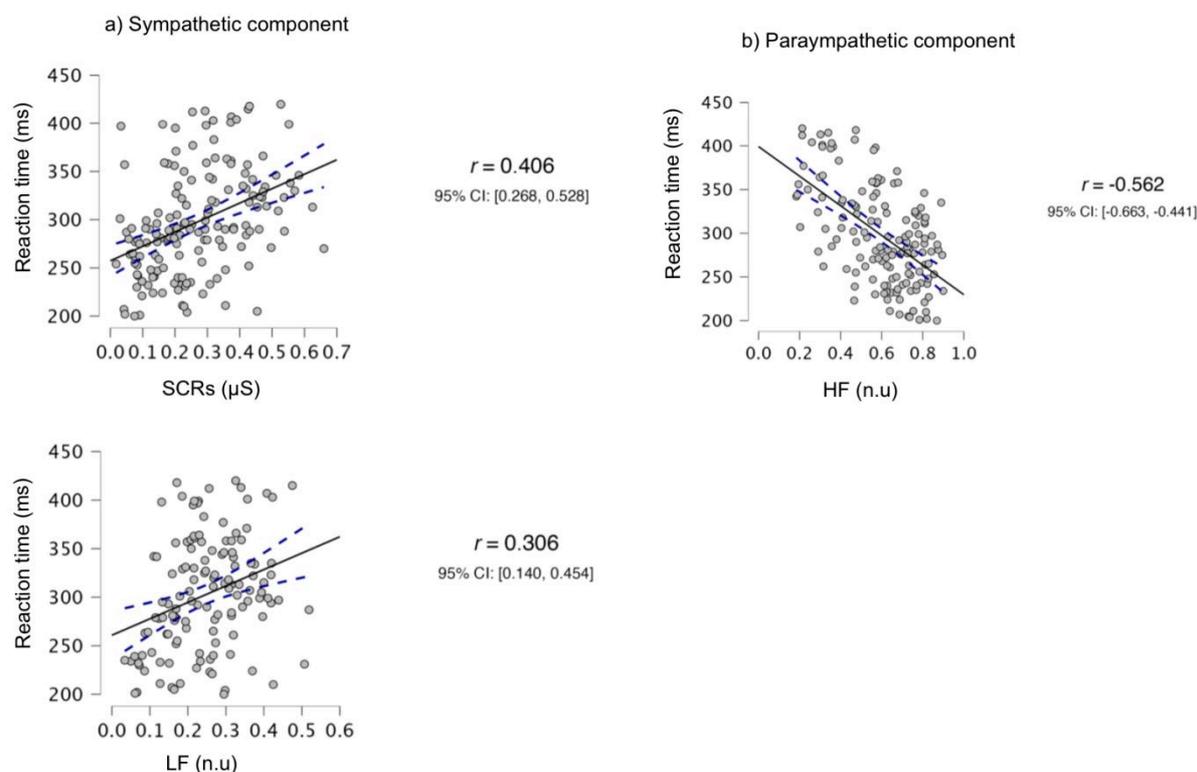


Figure 4. a) Correlation between LF and SCRs (sympathetic component) and reaction time and b) correlation between HF (parasympathetic component) and reaction time (right) during FP 710 and low force level.

Sympathovagal balance

A linear regression analysis at FP 710 and for a low force level, allowed us to predict, a significant relationship between LF/HF ratio and RTs within the MT group, $R^2 = 0.21$, $\{F = 35.33; p < 0.001\}$ (figure 5).

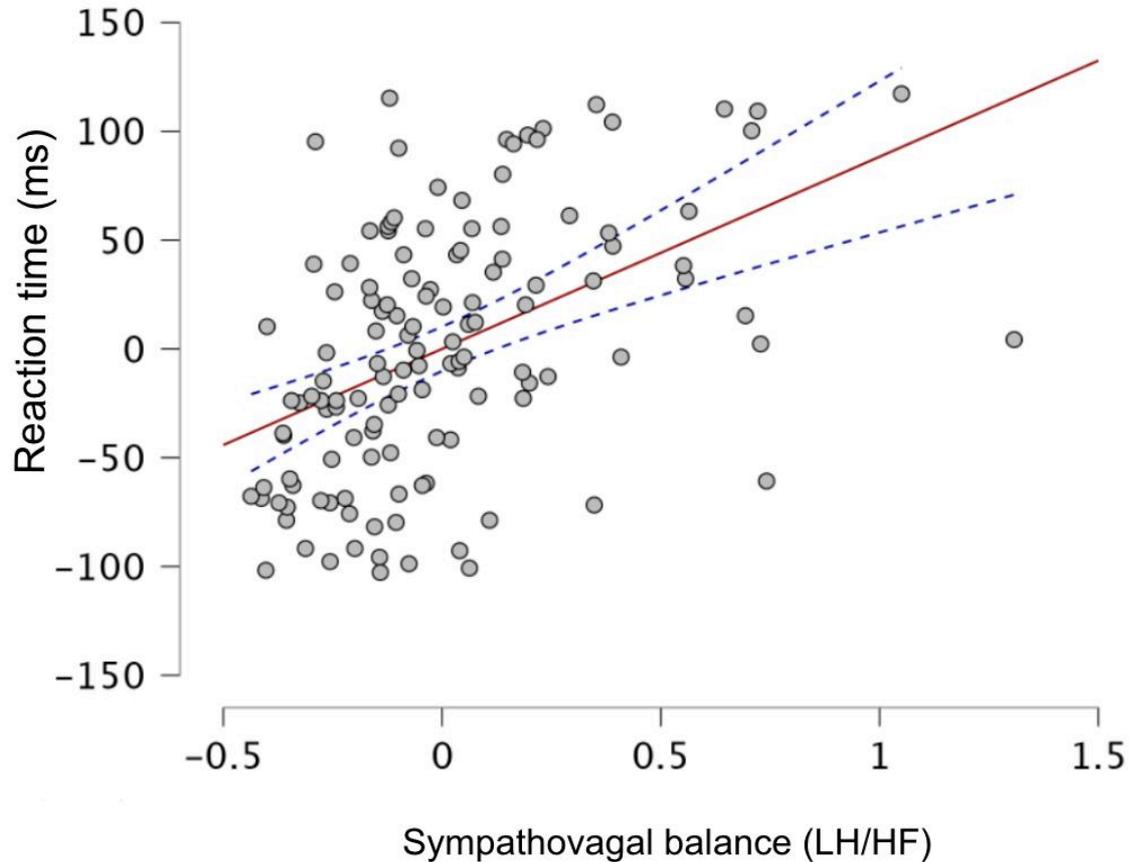


Figure 5. Results of the linear regression sympathovagal balance (LH/HF) and RTs in FP 710 low force level. The graph is a residual plot resulting of Durbin-Watson statistic to test the autocorrelation of the residuals (Field et al., 2012).

No significant difference between respiration rate in both groups (MT and wMT).

Discussion

The ability to selectively and rapidly allocate attentional resources in time and implement a cognitive-motor control is fundamental in proactive regulation of human behavior. The aim of our study was to investigate the temporal preparation phenomenon after attentional control reinforcement induced by an intensive and short session of mental training which allows to maintain a high state of arousal improving the autonomic nervous system activity. Our

1
2
3 behavioral results demonstrate a genuine improvement in RTs, notably at long FP (710 ms)
4 comparing to the short FP (650 ms) within MT group. The increased probability and thus the
5 predictability of imperative stimulus, induced by the FP, leads to decreased RT with increased
6 FP duration (Schröter et al., 2015). This FP effect observed during the endogenous alertness
7 task can be explained by increased attentional focus, allowing an efficient allocation of
8 attentional resources to respond at the prominent moment (Elithorn and Lawrence., 1995).
9
10 Participants were more efficient at long FPs where the top-down control takes time during the
11 alerting task to mobilize higher cognitive functions (Posner et al., 1982; Connor et al., 2004).
12 Also, the concomitant reinforcement of the autonomic arousal seems to facilitate and accelerate
13 the response of the subjects. In contrast, no significant improvement in RTs was observed
14 during the exogenous alertness task. This result is consistent with the idea that bottom-up
15 system corresponds to an immediate focusing of attention (Theeuwes., 1991) and autonomic
16 arousal does not appear to contribute to an improvement in response.
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33

34
35 Our research is in accordance with previous studies that have used alerting tasks to investigate
36 the temporal preparation phenomena with variable FPs. However, and to the best of our
37 knowledge, this is the first study combining a mental training session and autonomic nervous
38 system activity to examine, during a temporal preparation task, the cognitive and motor control.
39
40
41
42
43
44
45
46

47 During the short FP (650 ms), we observed that the high force level dominated RTs. This result
48 is consistent with the of Los's trace-conditioning model (2001); the amount of preparation
49 during FP is less at short than at long FPs because short FPs are often associated with non-
50 responding. This reduced response readiness might unable an optimal premotor regulation of
51 force response, and gives rise to more forceful responses that were more difficult to inhibit (Ray-
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 Li et al., 2005). Reduced FPs and increasing force levels induced a decline in cognitive task
4 performance manifested by increasing RTs and anticipation rate.
5
6
7

8
9
10 Additionally, during the short FP, mental training did not lead to significant improvement in
11 force response accuracy and anticipations widely increase. Consequently, we may suggest that
12 when the attention was divided between mental effort, warning (cue) and target (imperative
13 stimulus), anticipations extensively increase and the accuracy of responses decreases
14 significantly; the mental training does not seem effective to increase accuracy of the motor
15 responses. This interpretation was supported by Kahneman (1973) and Daly et al (2020) which
16 consider the interference between signals is due to lack of temporal deployment of attention to
17 task cognitive demands. In a similar vein, we suppose that time pressure related to the mental
18 effort at short FPs with a high force level may mobilize suddenly and rapidly the autonomic
19 arousal (notably the sympathetic component) and subjects cannot reach an optimal cognitive
20 level during short FPs intervals. Thereby, the increased sudden mental effort during short time
21 scales (FP) produces a cognitive interference which reduces allocation of resources to moments
22 of the target and gives rise to a phenomenon of inability to control the engagement of
23 endogenous temporal attention.
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43

44 During the long FP (710 ms), we observed that the low force level dominated RTs. Our results
45 showed that lower force levels resulted in short RTs and more accuracy compared to the higher
46 force level. This result shows that the low force level does not require a substantial mental and
47 physical effort, so participants are more constantly focused on the target arrival and forget the
48 cue. The significant improve in motor responses accuracy demonstrate that endogenous
49 temporal attention would ameliorate the speed and accuracy of responses as shown in
50 (Lawrence and Klein., 2013). Moreover, the improvement of cognitive performance could be
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 explained by an autonomic arousal modulation produced during the MT session which would
4 help to ensure an optimal arousal reinforcing the cognitive motor control. Thereby, long FPs
5 and low force level make a state of optimal sustained attention where arousal is prolonged for
6 a period of time and the mind maintains focus with a constant effort to efficiently solicit
7 attention resources (Helge Johnsen et al., 2002, Petersen and Posner., 2012).
8
9

10
11
12 Interestingly, our study managed to show significant psycho-neurophysiological interactions
13 between ANS components and cognitive performance (RTs) during the temporal preparation
14 task. At short FPs and for a high force level, our results showed that increasing RTs were
15 positively correlated with the increasing of sympathetic activity (LF and SCR), and negatively
16 correlated with the decreasing of parasympathetic activity (HF). This result suggests that the
17 sympathetic component would be dominantly mobilized when participants speed up their
18 response with little precision. Previous studies showed that the impaired sympathetic vagal
19 balance and changes in HRV are associated with changes in the dorsolateral prefrontal cortex
20 (Thayer et al., 2012) and influence working memory (Forte et al., 2019), attention (Alba et al.,
21 2019), and cognitive flexibility (Alasfour et al., 2021). Therefore, increased mental effort
22 induced by short FPs and high force level heightens the sympathetic component of the
23 autonomic arousal which disrupt cognitive performance and leads to decreased force accuracy
24 and increased RTs. From a neurobiological point of view, reduced FPs duration and increased
25 force level mobilize sympathetic system which may inhibit the visceral vagus to stimulate the
26 mobilization of behaviors that necessary for 'fight or flight' (Cannon., 1928; Porges., 2001).
27
28 This increased sympathetic activity leads to the release of adrenaline and noradrenaline which
29 facilitate the use of energy and prepare the body to rapid reactions (Sved et al., 2001).
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 More interestingly, at long FPs and for a low force level, our results indicate that the decreasing
4
5 of RTs were negatively correlated with the increasing parasympathetic activity (HF) and
6
7 positively correlated with the sympathetic activity (LF and SCRs). This result suggests that the
8
9 parasympathetic component of the autonomic arousal is consistent with an optimal (critical)
10
11 state of attention, reflecting a better cognitive performance. Previous reports showed that a
12
13 combination of inhibition and excitation states occurs during FPs interval (Posner & Boies.,
14
15 1971; Salet et al., 2022); consequently, the parasympathetic dominance during long FPs and
16
17 low force level condition might reflect an inhibition process of irrelevant and premature
18
19 responses to facilitate the speed and the efficiency of the response (Graham et al., 1966). From
20
21 a neurobiological point of view, reduced RTs and enhanced force response accuracy could be
22
23 explained by the activation of cholinergic neurons which modulate the cognitive-motor control
24
25 and thinking capacity (Parikh & Sarter., 2008). Finally, we showed in our study that the
26
27 cognitive performance during long FPs and low force level can be predicted by the
28
29 sympathovagal balance (LF/HF). This result goes in line with a previous study demonstrating
30
31 that the speed-accuracy trade-off can be predicted through a high vagal activity (Hansen,
32
33 Johnsen & Thayer., 2003).
34
35
36
37
38
39
40
41

42 **Methodological Limits**

43
44
45 In our study, we have analyzed the HRV data using mainly a spectral analysis method where
46
47 we extracted HF as an indicator widely used to quantify the parasympathetic vagal tonus and
48
49 LF as a dominant sympathetic component. Also, we assumed in our results that the LF/HF ratio
50
51 may vary linearly with the RT. However, it is highly likely that the two sympathetic and
52
53 parasympathetic systems interact in a non-linear manner due to complex interactions that occur
54
55 between them. Accordingly, to this remark, we should be careful using the LF/HF ratio to
56
57 quantify the sympathovagal balance (Pagani et al., 1984; Malliani et al., 1991). An alternative
58
59
60

1
2
3 solution would be to consider non-linear methods as for example the Poincare plot which makes
4
5 it possible to index the complexity and the adaptation of the systems (Schubert et al., 2009; Roy
6
7 et Ghatak., 2013). Also, a measurement of the entropy of the system using the Approximate
8
9 Entropy index (Pincus., 2001) could be another option that allows a measure of the amount of
10
11 information needed to predict the evolution of the state of the system. Finally, another limitation
12
13 of this study was the small number of participants. Future studies with a larger sample size
14
15 should be performed to confirm our findings.
16
17
18
19
20

21 **Conclusion**

22
23
24
25 Our study demonstrates that the allocation of attentional resources across time depends on
26
27 physical effort (force level), the mental training and the mobilization of ANS components.
28
29 Indeed, we succeed to show interactions between the autonomic nervous system and cognitive-
30
31 motor performance (RTs-force) during an endogenous alertness task which combine motor
32
33 and cognitive responses. The FP-induced time pressure increased sympathetic activity,
34
35 especially at short FP and high force level leading to poorer cognitive performance. Conversely,
36
37 long FPs and low force level increased the parasympathetic component of autonomic arousal
38
39 making it possible to optimize cognitive-motor control and leading to improve the cognitive
40
41 performance.
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55

56 **References**

57
58
59
60

1
2
3 Alasfour, A., et al. (2021). "High Activity in Cortex and Hippocampus Is Correlated with
4 Autonomic Tone during Sleep." *Eneuro* 8(6). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0194-21>
5
6
7

8
9
10 Alba, G., et al. (2019). "The relationship between heart rate variability and
11 electroencephalography functional connectivity variability is associated with cognitive
12 flexibility." *Frontiers in human neuroscience* 13: 64. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00064>
13
14
15
16

17
18
19 Backs, R. W. and A. M. Ryan (1992). Multimodal measures of mental workload during dual-
20 task performance: energetic demands of cognitive processes. *Proceedings of the Human*
21 *Factors Society Annual Meeting*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
22
23
24
25
26 <https://doi.org/10.1177/154193129203601811>
27
28

29
30 Berntson, G. G., Thomas Bigger, J., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik,
31 M., ... Van Der Molen, M. W. (1997). Heart rate variability: Origins, methods, and
32 interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623-648. [https://doi.org/10.1111/j.1469-](https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02140.x)
33
34
35
36
37
38
39

40
41 Cannon, W. B. (1914). "The emergency function of the adrenal medulla in pain and the major
42 emotions." *American Journal of Physiology-Legacy Content* 33(2): 356-372.
43
44
45

46
47
48 Cannon, W. B. (1928). "Neural organization for emotional expression."
49
50
51

52
53
54
55 Coull, J. T., Nobre, A. C., & Frith, C. D. (2001). The noradrenergic $\alpha 2$ agonist clonidine
56 modulates behavioural and neuroanatomical correlates of human attentional orienting and
57 alerting. *Cerebral cortex*, 11(1), 73-84. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.1.73>
58
59
60

1
2
3
4
5 Connor, C. E., et al. (2004). "Visual attention: bottom-up versus top-down." *Current biology*
6
7 14(19): R850-R852. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.09.041>
8
9

10
11
12 Critchley, H. D. (2002). "Electrodermal responses: what happens in the brain." *The*
13
14 *Neuroscientist* 8(2): 132-142. <https://doi.org/10.1177/107385840200800>
15
16

17
18
19 Critchley, H. D., Mathias, C. J., & Dolan, R. J. (2001). Neural activity in the human brain
20
21 relating to uncertainty and arousal during anticipation. *Neuron*, 29(2), 537-545.
22
23 [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00225-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00225-2)
24
25

26
27
28 Daly, S., et al. (2020). "Temporal deployment of attention by mental training: an fMRI
29
30 study." *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 20(4): 669-683.
31
32 <https://doi.org/10.3758/s13415-020-00795-4>
33
34

35
36
37 Decety, J. (1996). "The neurophysiological basis of motor imagery." *Behavioural brain*
38
39 *research* 77(1-2): 45-52. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(95\)00225-1](https://doi.org/10.1016/0166-4328(95)00225-1)
40
41

42
43
44 Denver, J. W., Reed, S. F., & Porges, S. W. (2007). Methodological issues in the
45
46 quantification of respiratory sinus arrhythmia. *Biological psychology*, 74(2), 286-294.
47
48 <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.09.005>
49
50

51
52
53 Electrophysiology, T. F. O. T. E. S. O. C. T. N. A. S. O. P. (1996). Heart rate variability:
54
55 standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5),
56
57 1043-1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
58
59
60

1
2
3 Elithorn, A. and C. Lawrence (1955). "Central inhibition-some refractory observations."
4
5 Quarterly Journal of Experimental Psychology 7(3): 116-127.
6
7 <https://doi.org/10.1080/17470215508416684>
8
9

10
11
12 Forte, G., et al. (2019). "Heart rate variability and cognitive function: A systematic review."
13
14 Frontiers in neuroscience 13: 710. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00710>
15
16

17
18
19 Graham, F. K. and R. K. Clifton (1966). "Heart-rate change as a component of the orienting
20
21 response." Psychological bulletin 65(5): 305. <https://doi.org/10.1037/h0023258>
22
23

24
25
26 Grossman, P., et al. (1990). "A comparison of three quantification methods for estimation of
27
28 respiratory sinus arrhythmia." Psychophysiology 27(6): 702-714.
29
30 <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1990.tb03198.x>
31
32

33
34
35
36
37 Hansen, A. L., et al. (2003). "Vagal influence on working memory and attention."
38
39 International Journal of Psychophysiology 48(3): 263-274. [https://doi.org/10.1016/S0167-
40
41 8760\(03\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00073-4)
42
43

44
45
46 Helge Johnsen, B., et al. (2002). "Dichotic listening and sleep deprivation: vigilance effects."
47
48 Scandinavian Journal of Psychology 43(5): 413-417. <https://doi.org/10.1111/1467-9450.00309>
49
50

51
52
53 Kahneman, D. (1973). Attention and effort (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ:
54
55 Prentice-Hall.
56
57
58
59
60

1
2
3 Kahneman, D., et al. (1969). "Pupillary, heart rate, and skin resistance changes during a
4 mental task." *Journal of experimental psychology* 79(1p1): 164.

5
6
7 <https://doi.org/10.1037/h0026952>
8
9

10
11
12 Lacey, J. I. (1967). "Somatic response patterning and stress: Some revisions of activation
13 theory." *Psychological stress: Issues in research*: 14-37.

14
15
16
17
18
19 Lawrence, M. A. and R. M. Klein (2013). "Isolating exogenous and endogenous modes of
20 temporal attention." *Journal of Experimental Psychology: General* 142(2):

21
22
23 560. <https://doi.org/10.1037/a0029023>
24
25

26
27
28 Li, C.-S. R., et al. (2005). "Fore-period effect and stop-signal reaction time." *Experimental*
29
30 *brain research* 167(2): 305-309. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0110-2>
31

32
33
34
35 Los, S. A., et al. (2001). "The foreperiod effect revisited: Conditioning as a basis for
36 nonspecific preparation." *Acta psychologica* 106(1-2): 121-145. [https://doi.org/10.1016/S0001-](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(00)00029-9)
37
38
39 [6918\(00\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(00)00029-9)
40

41
42
43
44 Los, S. A., et al. (2014). "Outlines of a multiple trace theory of temporal preparation."
45
46 *Frontiers in Psychology* 5: 1058. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01058>
47

48
49
50
51 Malliani, A., et al. (1991). "Cardiovascular neural regulation explored in the frequency
52 domain." *Circulation* 84(2): 482-492. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.84.2.482>
53

54
55
56
57 McCormick, C., et al. (2019). "On the selection of endogenous and exogenous signals." *Royal*
58
59 *Society open science* 6(11): 190134. <https://doi.org/10.1098/rsos.190134>
60

1
2
3
4
5 Montano, N., et al. (1994). "Sympathovagal Balance During Graded Orthostatic Tilt."

6
7 <https://doi.org/10.1161/01.CIR.90.4.1826>
8
9

10
11
12 Niemi, P. N. "R. (1981)." Foreperiod and simple reaction time. Psychological Bulletin 89:

13
14 133-162. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.89.1.133>
15
16
17

18
19 Nobre, A. C. (2001). "Orienting attention to instants in time." Neuropsychologia 39(12):

20
21 1317-1328. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00120-8)
22
23
24

25
26 Nobre, A. C., et al. (2010). Attention and time, Oxford University Press, USA.
27
28
29

30
31 Pagani, M., et al. (1984). "Power spectral density of heart rate variability as an index of
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
sympatho-vagal interaction in normal and hypertensive subjects." Journal of hypertension.
Supplement: official journal of the International Society of Hypertension 2(3): S383-385.

[6599685](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(84)90068-5)

Parasuraman, R. (1987). "Human-computer monitoring." Human Factors 29(6): 695-706.

<https://doi.org/10.1177/00187208870290060>

Parikh, V., & Sarter, M. (2008). Cholinergic mediation of attention: contributions of phasic
and tonic increases in prefrontal cholinergic activity. Annals of the New York Academy of
Sciences, 1129(1), 225-235. <https://doi.org/10.1196/annals.1417.021>

Petersen, S. E. and M. I. Posner (2012). "The attention system of the human brain: 20 years
after." Annual review of neuroscience 35: 73.

<https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>

1
2
3
4
5 Périn, B., Godefroy, O., Fall, S., & de Marco, G. (2010). Alertness in young healthy subjects:
6 an fMRI study of brain region interactivity enhanced by a warning signal. *Brain and*
7
8 *cognition*, 72(2), 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.09.010>
9
10
11
12

13
14 Pincus, S. M. (2001). "Assessing serial irregularity and its implications for health." *Annals of*
15 *the New York Academy of Sciences* 954(1): 245-267. [https://doi.org/10.1111/j.1749-](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb02755.x)
16
17 [6632.2001.tb02755.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb02755.x)
18
19
20
21

22
23 Porges, S. W. (1972). "Heart rate variability and deceleration as indexes of reaction time."
24 *Journal of experimental psychology* 92(1): 103. <https://doi.org/10.1037/h0032181>
25
26
27
28

29
30 Porges, S. W. (1992). "Autonomic regulation and attention." *Attention and information*
31 *processing in infants and adults*: 201-223.
32
33
34

35
36
37 Porges, S. W. (2001). "The polyvagal theory: phylogenetic substrates of a social nervous
38 *system*." *International Journal of Psychophysiology* 42(2): 123-146.
39
40
41 [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(01\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(01)00162-3)
42
43
44

45
46 Porges, S. W. and D. C. Raskin (1969). "Respiratory and heart rate components of attention."
47 *Journal of experimental psychology* 81(3): 497. <https://doi.org/10.1037/h0027921>
48
49
50

51
52
53 Posner, M. I. and S. J. Boies (1971). "Components of attention." *Psychological review* 78(5):
54
55 391. <https://doi.org/10.1037/h0031333>
56
57
58
59
60

1
2
3 Posner, M. I., et al. (1982). "Neural systems control of spatial orienting." *Philosophical*
4
5 *Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 298(1089): 187-198.

6
7 <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0081>
8
9

10
11
12 Posner, M. I., et al. (1973). "On the selection of signals." *Memory & cognition* 1(1): 2-12.

13
14 <https://doi.org/10.3758/BF03198062>
15
16

17
18 Ritz, T., Dahme, B., Dubois, A. B., Folgering, H., Fritz, G. K., Harver, A., ... van de
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Woestijne, K. P. (2002). Guidelines for mechanical lung function measurements in
psychophysiology. *Psychophysiology*, 39(5), 546-567. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3950546>

Roy, B., & Ghatak, S. (2013). Nonlinear methods to assess changes in heart rate variability in
type 2 diabetic patients. *Arquivos brasileiros de cardiologia*, 101, 317-327.

<https://doi.org/10.5935/abc.20130181>

Salet, J. M., et al. (2022). "FMTP: A unifying computational framework of temporal
preparation across time scales." *Psychological review*. <https://doi.org/10.1037/rev0000356>

Schröter, H., et al. (2015). "Task predictability influences the variable foreperiod effect:
Evidence of task-specific temporal preparation." *Psychological research* 79(2): 230-237.

<https://doi.org/10.1007/s00426-014-0550-z>

Schubert, C., et al. (2009). "Effects of stress on heart rate complexity—a comparison between
short-term and chronic stress." *Biological psychology* 80(3): 325-332.

<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.11.005>

1
2
3
4
5 Sturm, W., & Willmes, K. (2001). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic
6 alertness. *Neuroimage*, 14(1), S76-S84. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0839>
7

8
9
10
11
12 SPR Ad Hoc Committee on Electrodermal Measures. (2012). Publication recommendations
13 for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, 49(8), 1017-1034.
14
15 <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01384.x>
16
17

18
19
20
21 Sved, A., et al. (2001). "Neuroanatomical specificity of the circuits controlling sympathetic
22 outflow to different targets." *Clinical and experimental pharmacology & physiology* 28(1-2):
23 115-119. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1681.2001.03403.x>
24
25
26

27
28
29
30
31 Sweller, J., et al. (1998). "Cognitive architecture and instructional design." *Educational*
32 *psychology review* 10(3): 251-296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>.
33
34

35
36
37
38 Thayer, J. F., et al. (2009). "Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive
39 performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and
40 health." *Annals of Behavioral Medicine* 37(2): 141-153. [https://doi.org/10.1007/s12160-009-](https://doi.org/10.1007/s12160-009-9101-z)
41
42
43
44
45 [9101-z](https://doi.org/10.1007/s12160-009-9101-z)
46

47
48
49 Thayer, J. F. and R. D. Lane (2000). "A model of neurovisceral integration in emotion
50 regulation and dysregulation." *Journal of affective disorders* 61(3): 201-216.
51
52 [https://doi.org/10.1016/S0165-0327\(00\)00338-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0327(00)00338-4)
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 Thayer, J. F., et al. (2012). "A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging
4 studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health." *Neuroscience*
5 & *Biobehavioral Reviews* 36(2): 747-756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
6
7
8
9

10
11
12 Theeuwes, J. (1991). "Exogenous and endogenous control of attention: The effect of visual
13 onsets and offsets." *Perception & psychophysics* 49(1): 83-90.
14
15
16 <https://doi.org/10.3758/BF03211619>
17
18
19

20
21 Wang, J. et al (2004). "RBF kernel based support vector machine with universal
22 approximation and its application". In *International symposium on neural networks* Springer,
23 Berlin, Heidelberg (pp. 512-517). https://doi.org/10.1007/978-3-540-28647-9_85.
24
25
26
27

28
29
30 Woodrow, H. (1914). "The measurement of attention." *The psychological monographs* 17(5):
31 i. <https://doi.org/10.1037/h0093087>
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60