HAL
open science

Influence de stratégies nutritionnelles sur le fonctionnent cognitif au cours d'une sollicitation physiologique

Laura Pomportes-Castagnet

To cite this version:

Laura Pomportes-Castagnet. Influence de stratégies nutritionnelles sur le fonctionnent cognitif au cours d'une sollicitation physiologique. Education. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2018. Français. NNT : 2018AZUR4057 . tel-02007559

HAL Id: tel-02007559

https://theses.hal.science/tel-02007559v1

Submitted on 5 Feb 2019

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.

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

Aix*Marseille université

THÈSE DE DOCTORAT

Influence de stratégies nutritionnelles sur le fonctionnement cognitif au cours d'une sollicitation physiologique

Laura POMPORTES-CASTAGNET

Laboratoire Motricité Humaine, Expertise, Sport Santé, Université Côte d'Azur
Laboratoire de Psychologie Cognitive, Aix-Marseille Université

Présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en Sciences du Mouvement Humain
de l'Université Côte d'Azur
Dirigée par : Pr. Jeanick Brisswalter / Dr. Karen Davranche
Soutenue le : Vendredi 13 Juillet 2018

Devant le jury, composé de :
Romain Meeusen, Pr, Université de Bruxelles, Rapporteur
Aurélien Pichon, Dr, MCF-HDR, Université de Poitiers, Rapporteur
Laurence Casini, Dr, MCF-HDR, Aix-Marseille Université, Examinatrice
Fabienne d'Arripe-Longueville, Pr, Université Côte d'Azur, Examinatrice
Jeanick Brisswalter, Pr, Université Côte d'Azur, directeur
Karen Davranche, Dr, Chargée de Recherche, CNRS, Aix-Marseille Université, co-directrice

FÉDÉRATION FRANÇAISE SQUASH

CREPS PACA

Remerciements

L'ensemble des travaux effectués au cours de ces trois années de thèse a été réalisé au sein du **CREPS PACA** site d'Aix-en Provence, en partenariat la **Fédération Française de Squash**, ainsi qu'avec le laboratoire de **Motricité Humaine, Education, Sport Santé** de l'UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives de l'Université de Nice Sophia Antipolis, et le laboratoire de **Psychologie Cognitive** de l'Université d'Aix-Marseille.

Tout d'abord je voudrais remercier le CREPS PACA qui m'a donné des conditions optimales pour concilier au mieux carrière sportive et travail de thèse pendant plus de 2 ans. Avoir eu cette opportunité de continuer ma carrière internationale tout en menant de front une thèse était pour moi un rêve d'une vie. Merci aussi à la Fédération Française de Squash et notamment **Henri Prévost** et **Jean-Denis Barbet** qui ont contribué à la réussite de ce projet.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au laboratoire **Menarini France** qui nous a offert des supplémentations nutritionnelles de qualité, utilisées pour l'ensemble de ces travaux de thèse.

Je voudrais profondément remercier mes deux directeurs de thèse, **Jeanick Brisswalter** et **Karen Davranche** pour leur accompagnement tout au long de ce projet. Tout d'abord merci Jeanick d'avoir cru en moi et de m'avoir permis de réaliser cette thèse. Tout au long de ces quatre années passées ensemble, votre regard bienveillant et empathique n'a eu de cesse de me donner confiance et de me

permettre d'avancer. Un grand merci à vous aussi Karen. Vous m'avez permis de découvrir et me former avec rigueur et précision à un champ qui m'était jusqu'alors méconnu. Vos deux enseignements ont été très formateurs et largement complémentaires. J'espère que je saurai en être digne tout au long de ma carrière professionnelle.

Je souhaiterais chaleureusement remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de mon travail ainsi que pour les remarques constructives qu'ils m'adresseront lors de ma soutenance. A ce titre, un grand merci au professeur **Romain Meeusen** et au docteur **Aurélien Pichon** qui me font l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail de thèse.

Je tiens également à exprimer mes plus sincères remerciements au docteur **Laurence Casini** et au professeur **Fabienne d'Arripe-Longueville** pour leurs rôles d'examinatrices de mon travail de thèse.

Impossible de parler des personnes qui m'ont permis de réaliser ce travail sans souligner l'implication sans borne d'**Arnaud Hays**. Quand je t'ai connu j'étais une athlète un peu isolée. Tu m'as entraînée pour gagner, mais aussi réathlétisée et soutenue quand je suis me suis écroulée. Tu m'as conseillée dans mes choix et avant toi je n'aurai jamais cru possible de faire une thèse. Merci de m'accompagner depuis maintenant 8 ans.

Ces quelques mois passés au laboratoire de psychologie cognitive ont été très formateurs. Je souhaiterais remercier chaleureusement **Thibault Gajdos** pour sa bonne humeur et ses explications passionnées ainsi que **Laurence Casini** pour ses clarifications sur le traitement temporel, domaine que je trouve extrêmement

captivant. Merci aussi à **Kamila Smigasiewicz** pour sa gentillesse et ses explications très pédagogiques concernant l'utilisation de l'électroencéphalographie.

Je voudrais vivement remercier l'ensemble des athlètes du CREPS PACA et plus particulièrement **les escrimeurs, les squasheurs, les BMX et les pentathlètes** qui ont participé à l'ensemble de ces protocoles expérimentaux. Je ne sais que trop bien la charge que représentent vos entraînements et compétitions. Avoir participé à ces protocoles relativement lourds en plus de vos plannings est particulièrement courageux. J'ai essayé en retour de vous aider dans vos carrières respectives mais j'aurais aimé faire plus. Je vous souhaite beaucoup de réussite.

Merci aussi **aux entraîneurs des pôles** respectifs qui ont largement participé à la réussite de ces différentes études.

Par ailleurs je voudrais remercier un certain nombre de personnes au CREPS PACA qui ont participé à mon équilibre durant ces trois années, et indirectement à ma réussite dans ce projet. Merci au médecin **Frédérique Barthelemy** pour son suivi et son empathie ainsi qu'aux kinésithérapeutes et notamment **Anthony Fournier** qui m'ont suivis quotidiennement. Merci à ma secrétaire préférée **Carole** pour sa bonne humeur permanente et son aide.

Merci aussi à toi **Philou** pour nos discussions passionnées. Tu es d'une connaissance, d'une intelligence et d'une humilité peu commune.

Merci à mes amies. Merci à **Cyrielle, Laura, Maud et Laurie-Anne** pour leurs soutiens et leurs amitiés. Même si je ne suis pas des plus démonstrative, vous comptez énormément pour moi.

Merci **Domi** de m'avoir depuis toute petite, poussé à aller vers la connaissance et le questionnement. Merci aussi d'avoir accepté, certes sous la torture, de lire une partie de ce manuscrit.

Enfin, merci à ma famille et surtout à **ma maman**. Peut-être m'en as-tu voulu de ne pas avoir été à la hauteur quand j'ai arrêté ma carrière sportive. Mais aujourd'hui je te remercie plus que jamais. Je te remercie de t'être privée pour que je puisse faire du sport. Je te remercie de m'avoir toujours encouragée dans ma pratique tout en m'imposant de donner la priorité aux études. Même si il a été difficile de concilier les deux, j'ai toujours essayé de faire de mon mieux. Tu me disais « Laura travaille à l'école, tu pourras faire un métier qui te plaît et c'est ça le plus important… » Tu avais encore une fois raison. Aujourd'hui je vais pouvoir m'épanouir dans un métier qui me plaît. Merci pour tout.

Pour finir, merci à **mon mari**. Merci de m'avoir soutenue ou plutôt « supportée » pendant cette période de transition difficile. On se connaît maintenant depuis 19 ans. On a vécu tellement de choses ensembles. Aujourd'hui ma vie prend un autre tournant et je ne serai plus avec toi pour t'accompagner et te soutenir sur les compétitions. Mais je te souhaite toute la réussite que tu mérites. Top 10 mondial pour toi n'est pas impossible. Une fabuleuse carrière te tend les bras auréolée de belles victoires.

Enfin à tous ceux qui disent qu'à faire deux choses en même temps on ne peut exceller, je leur répondrai simplement que dans la vie tout est une question d'équilibre. Et c'est sans doute cela le plus important. L'équilibre.

Laura

Vis comme si tu devais mourir demain.

Apprends comme si tu devais vivre toujours.

Mahatma Gandhi.

Diffusion et présentation des résultats

L'ensemble de ces travaux de thèse a conduit à la publication de 4 articles dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture :

1. **Pomportes, L.**, Davranche, K., Brisswalter, I., Hays, A., Brisswalter, J. Heart rate variability and cognitive function following a multi-vitamin and mineral supplementation with added Guaranà (Paulliniacupana). *Nutrients*. 2014 Dec 31;7(1):196-208. doi: 10.3390/nu7010196.

2. **Pomportes, L.**, Brisswalter, J., Hays, A., Davranche, K. Effect of carbohydrate intake on maximal power output and cognitive performances. *Sports*. 2016, 4, 49 ; doi :10.3390/sports4040040.

3. **Pomportes, L.**, Brisswalter, J., Casini, L., Hays, A., Davranche, K. Cognitive performance enhancement induced by caffeine, carbohydrate and guarana mouth rinsing during submaximal exercise. *Nutrients*. 2017 Jun 9;9(6). doi: 10.3390/nu9060589.

4. **Pomportes, L.**, Brisswalter, J., Hays, A., Davranche, K. Do nutritional supplements enhance cognitive performance in high level athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Under review.

L'un de ces travaux a été publié dans une revue scientifique nationale à comité de lecture :

5. **Pomportes, L.,** Davranche, K., Hays, A., Brisswalter, J. Effet d'un complexe créatine-guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. *Science & Sports*. 2015. doi: 10.1016/j.scispo.2015.04.002.

Enfin, certains résultats ont été présentés au cours de congrès nationaux ou internationaux :

6. **Pomportes, L.**, Davranche, K., Brisswalter, J. (2015) Influence d'une stratégie nutritionelle sur la performance physique et cognitive. *INSEP*. Paris, France, Novembre.

7. **Pomportes, L.**, Davranche, K., Brisswalter, J. (2017) Influence of nutritional strategies on cognitive functions and rating of perceived exertion during an acute submaximal running exercise in high level athletes. *European Society for Cognitive Psychology*. Postdam, Allemagne, September.

Glossaire

Δ : delta

A : adrénaline

AMS : aire motrice supplémentaire

CAF : caféine

CCA : cortex cingulaire antérieur

CHO : hydrates de carbone

CHO-E : solution d'hydrates de carbone enrichie en électrolyte

CO : congruent

COF : cortex orbitofrontal

CPF : cortex préfrontal

CPFDL : cortex préfontal dorsolatéral

CRF : corticolibérine

DA : dopamine

EEG : électroencéphalographie

EMG : électromyographie

ex : exercice

FC : fréquence cardiaque

FCF : Fréquence Critique de Fusion

FC_{max} : fréquence cardiaque maximale

GLU : glucose

HHS : hypothalamo-hypophyso-surrénalien

HVA : acide homovanillique

Hz : hertz

IN : incongruent

IRMf : Imagerie à résonnance magnétique fonctionnelle

kj : kilojoule

km : kilomètre

MALT : maltodextrine

M_{di} : critère de jugement sensoriel

MFA : méthode des facteurs additifs

mg : milligramme

MHPG : 3-methoxy 4-hydroxyphenylglycol

min : minute

ml : millilitre

ms : milliseconde

M_{tot} : indice de sensibilité sensorielle

NA : noradrénaline

NFS : noyau du faisceau solitaire

ns : non significatif, p> .05

OF/IA : cortex gustatif primaire

Pl : placebo

PMA : puissance maximale aérobie

RB : rinçage de bouche

RPE : perception de l'effort

rpm : révolutions par minute

s : seconde

S : significatif, p< .05

SACH : saccharose

T1RS : cellules réceptrices des hydrates de carbone

TAS2R : cellules réceptrices du goût amer

TC : tronc cérébral

TE : taille d'effet

TM : temps moteur

TMS : stimulation magnétique transcrânienne

TPM : temps pré-moteur

TR : temps de réaction

TRC : temps de réaction de choix

TRCs : cellules réceptrices du goût

TRS : temps de réaction simple

TT : course contre la montre

VCN : variation contingente négative

$\dot{V}O_{2max}$: quantité maximale d'oxygène consommée

W : watt

Tables et Figures

FIGURES

FIGURE 1 – 25
Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive.

FIGURE 2 – 28
Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction du délai entre la fin de l'exercice et la passation de la tâche cognitive.

FIGURE 3 – 32
Tailles d'effet de l'exercice sur les fonctions exécutives issues de trois méta-analyses.

FIGURE 4 – 34
Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de l'intensité d'exercice et du moment de passation de la tâche.

FIGURE 5 – 35
Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de la durée de l'exercice.

FIGURE 6 – 36
Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de la modalité d'exercice et du moment de passation de la tâche cognitive.

FIGURE 7 – 37
Tailles d'effet de l'exercice sur les performances cognitives en fonction de la condition physique des sujets et du moment de passation de la tâche cognitive.

FIGURE 8 – 40
Représentation schématique des effets individuels et des contraintes des tâches (tâche cognitive et tâche physique) sur la relation entre exercice aigu et cognition.

FIGURE 9 – 49
Représentation schématique des projections de la voie noradrénergique.

FIGURE 10 – 50
Représentation schématique de la voie dopaminergique.

FIGURE 11 – 59
Processus mentaux impliqués dans une tâche de TRS, de Go/Nogo et de TRC.

FIGURE 12 – 63
Activité électromyographique d'un muscle agoniste impliqué dans la tâche de TR en réponse à l'apparition d'un signal.

FIGURE 13 – 75
(A) Effets du rinçage de bouche avec des CHO sur l'amélioration de la performance physique.
(B) Tailles d'effet du rinçage de bouche avec CHO sur la performance physique.

FIGURE 14 – 78
Tailles d'effet moyennes de l'utilisation des CHO en rinçage de bouche sur la performance d'endurance en fonction du statut nutritionnel du sujet.

FIGURE 15 – 85
Représentation schématique des voies gustatives centrales.

FIGURE 16 – 91
Tailles d'effet moyennes de l'ingestion de caféine sur la performance lors d'exercice court et intense, d'exercice incrémental jusqu'à épuisement et d'exercice d'endurance.

FIGURE 17 – 103
Effets de la caféine sur différentes cibles chimiques en fonction de sa concentration chez l'humain.

FIGURE 18 – 182
Distribution des TR pour les conditions pré-exercice et post-exercice.

TABLES

TABLE 1 – 71
Résumé chronologique des études ayant investigué l'effet des CHO en rinçage de bouche sur la performance d'endurance.

TABLE 2 – 93
Résumé chronologique des études ayant investigué l'effet de la caféine en rinçage de bouche sur la performance physique en fonction du type d'exercice.

Sommaire

REMERCIEMENTS 3
DIFFUSION ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 8
GLOSSAIRE 10
TABLES ET FIGURES 12
SOMMAIRE 15
PREAMBULE 18

PREMIÈRE PARTIE : CADRE THÉORIQUE

CHAPITRE 1 : Exercice aigu et Cognition 23

I – Effets de l'exercice sur la cognition 24
1.1. Etat actuel de la recherche 24
1.2. Facteurs méthodologiques d'influence de l'interaction 26
Moment de passation de la tâche cognitive 26
Nature de la tâche cognitive 28
Contraintes de l'exercice physique 32
Caractéristiques des sujets 36

II – Amélioration de la cognition lors de l'exercice : hypothèses explicatives 41
2.1. Exercice et éveil 41
2.2. Neuromodulation de l'éveil 46
2.3. Exercice et neuromodulateurs cérébraux 51
2.4. Neuromodulateurs, exercice et cognition : validation expérimentale 52

III – Localisation des effets de l'exercice sur le traitement de l'information sensorimotrice 57
3.1. Décomposition globale des activités sensorimotrices 57
3.2. Amélioration des processus sensoriels 59
3.3. Amélioration des processus tardifs moteurs 61

CHAPITRE 2 : Exercice aigu, Nutrition et Fonctionnement cérébral **66**

I – Hydrates de carbone **67**
1.1. Effets centraux des hydrates de carbone sur la performance 69
Effet sur la performance physique 69
Effet sur la perception de l'effort 79
Effet sur la performance cognitive 70
1.2. Effets centraux des hydrates de carbone sur la performance : hypothèses explicatives . 83

II – Caféine **90**
2.1. Effets de la caféine sur la performance 90
Effet sur la performance physique 90
Effet sur la perception de l'effort 94
Effet sur la performance cognitive 95
2.2. Effets de la caféine sur la performance : hypothèses explicatives 99
En ingestion 99
Sans ingestion : chewing-gum, rinçage de bouche et aérosols 104

III – Guarana **108**
3.1. Effets du guarana sur la performance 108
3.2. Effets du guarana sur la performance : hypothèses explicatives 110

SECONDE PARTIE : CONTRIBUTION EXPERIMENTALE

Hypothèses et objectifs **114**

ETUDE n°1 : **119**
Heart rate variability and cognitive function following a multi-vitamin and mineral supplementation with added guarana (*Paullinia cupana*).

ETUDES n° 2 et 3 : **135**
Effet d'un complexe créatine-guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance.
Effect of carbohydrate intake on maximal power output and cognitive performances.

ETUDE n° 4 : **159**
Cognitive performance enhancement induced by caffeine, carbohydrate and guarana mouth rinsing during submaximal exercise.

ETUDE n° 5 : **179**
Do nutritional supplements enhance cognitive performance in high level athletes?

TROISIÈME PARTIE : DISCUSSION GÉNÉRALE

I – Effets d'une sollicitation physiologique **202**

II – Effets de la nutrition **204**
2.1. Effets de la caféine 205
2.2. Effets du guarana 209
2.3. Effets des hydrates de carbone 211

CONCLUSION GENERALE 214
REFERENCES 218

Préambule

La performance sportive est un champ expérimental complexe et plurimodal qui est la source de nombreuses interrogations depuis le début du XXème siècle. En effet, de nombreux travaux scientifiques ont tenté de la comprendre, sans y parvenir pleinement, notamment en raison de l'implication concomitante de plusieurs facteurs de performance. Parmi ces diverses composantes, l'aspect des processus cognitifs reste peu exploré dans le champ sportif, alors même que celui-ci est primordial pour la performance de l'athlète. Par composante cognitive, nous faisons référence aux activités mentales qui permettent à l'individu de traiter et d'assimiler les informations qui lui parviennent afin d'atteindre un but précis et déterminé.

Dans l'analyse et la compréhension de la performance, le champ sportif est arrivé au présupposé empirique selon lequel la fatigue altèrerait la performance cognitive. Dans ce cadre, de nombreux protocoles expérimentaux ont utilisé des techniques issues du champ de la psychologie expérimentale afin de valider cette hypothèse. L'approche cognitiviste de la psychologie, est un modèle récent dont le développement s'associe à l'apparition des nouvelles techniques proches de l'informatique, qui ont connu un essor dans les années 1950 notamment aux Etats-Unis. Considérée comme le courant dominant de la psychologie actuelle, elle s'intéresse au rôle et à la nature des activités mentales qui s'intercalent entre l'apparition d'un stimulus et la réponse comportementale notamment dans le cadre du paradigme de la chronométrie mentale (Donders 1868). Ce paradigme postule que les opérations mentales peuvent être étudiées par l'intermédiaire d'une variable clé, le

temps de réaction, considéré comme un témoin observable du temps nécessaire à l'élaboration d'une réponse. Ainsi, l'étude des variations du temps de réaction lors de l'exercice ou de façon plus générale avec la fatigue s'est développée depuis le milieu du 20ème siècle (e.g. Welford 1968) et dans la littérature scientifique afin d'étudier l'effet d'interaction entre l'exercice et les processus cognitifs.

Dans un même temps, le champ de la recherche dans les sciences du sport a considérablement investigué l'effet de la nutrition sur la performance de l'athlète. Depuis plus de 50 ans et selon les disciplines sportives, diverses recommandations nutritionnelles sont régulièrement émises et mises à jour par les sociétés savantes du domaine concernant le type de supplémentation, la quantité ingérée ou encore le moment d'ingestion (Burke, Millet, et Tarnopolsky 2007; Jeukendrup 2011). Ces études sur l'efficacité des stratégies nutritionnelles sont majoritairement centrées sur les aspects énergétiques de la performance avec pour rôles principaux d'optimiser la performance lors d'une séance d'entraînement ou de compétition, de favoriser la récupération ou encore de maintenir un état de santé optimal ainsi qu'une composition corporelle adaptée (Burke 2007). A l'inverse l'effet des stratégies nutritionnelles sur le fonctionnement cérébral et plus spécifiquement sur les processus cognitifs n'a été que récemment investigué (e.g. Meeusen 2014).

Les premières études dans ce domaine sont issues des recherches sur les mécanismes centraux de la fatigue lors de l'exercice. La fatigue centrale regroupe les facteurs déterminants la diminution de la contractilité musculaire indépendamment des facteurs intramusculaires ou métaboliques ainsi que la modification des comportements. Elle peut agir soit au niveau cortical, soit au niveau périphérique de la commande nerveuse de la contraction musculaire. Elle a pour conséquence une diminution de la commande nerveuse de la motricité (Guezennec 2001). Parmi les

hypothèses explicatives de la fatigue centrale, certaines sont basées sur la modification de la synthèse et/ou du métabolisme des monoamines centrales au cours de l'exercice et notamment de la sérotonine, la dopamine et la noradrénaline (Newholme 1987 ; Meeusen et al. 2006a). A ce titre, plusieurs auteurs ont investigué l'effet de manipulation pharmacologique (Bailey, Davis, et Ahlborn 1992) et de supplémentations nutritionnelles composées d'hydrates de carbone (Davis et al. 1992) et d'acides aminés branchés (Blomstrand et al. 1991) sur les phénomènes centraux de la fatigue. Bien que l'effet positif de la supplémentation nutritionnelle sur la fatigue reste néanmoins mal connu et l'objet de controverses, il est souvent suggéré un effet préventif de la nutrition sur l'apparition de ces phénomènes de fatigue centraux (Meeusen, Watson, et Dvorak 2006b).

Par ailleurs, les études pharmacologiques ont montré que la dopamine et la noradrénaline sont des neurotransmetteurs impliqués dans la performance cognitive chez l'humain (Berridge et al. 2006). Dans ce cadre, il est possible de se demander si l'impact bénéfique de la nutrition sur le fonctionnement cérébral peut aussi améliorer le fonctionnement cognitif au cours de l'exercice, même en absence de fatigue. La problématique de notre travail s'inscrit dans ce questionnement.

Ce travail de thèse s'articule dans un premier temps autour d'un cadre théorique qui présente un état des lieux de la recherche dans le domaine. D'une part, sur l'interaction entre exercice aigu et la cognition. Dans ce cadre nous présenterons une hypothèse explicative de l'effet de l'exercice sur la cognition ainsi qu'une localisation de l'effet sur la chaîne de traitement de l'information sensorimotrice. D'autre part, les effets de trois types de supplémentations nutritionnelles sur le fonctionnement cérébral, qui sont classiquement consommées par les sportifs, seront présentés.

Dans un second temps, la contribution expérimentale issue de ces travaux de thèse sera exposée. A la suite des travaux expérimentaux menés, nous présenterons une discussion sur la globalité des résultats obtenus, leurs parts relatives dans la revue de littérature actuelle, ainsi que les questions qu'ils soulèvent.

PREMIERE PARTIE :

CADRE THEORIQUE

CHAPITRE 1

Exercice aigu et Cognition

Dans de nombreuses activités physiques et sportives, la performance dépend de l'efficacité des processus cognitifs et physiologiques sollicités dans l'action. Parmi la large variété de processus cognitifs impliqués, la performance sportive est fréquemment influencée par l'efficacité des processus décisionnels qui s'effectuent sous pression temporelle. En effet, la performance du sportif confronté à une forte charge informationnelle et à une pression temporelle élevée nécessite la capacité à produire une réponse exacte et à exécuter un mouvement rapide tout en conservant une grande précision spatio-temporelle. Aussi une meilleure compréhension de l'interaction entre ces processus cognitifs et l'exercice est particulièrement importante pour l'amélioration des stratégies d'entraînements et de compétition chez l'athlète.

I – Effets de l'exercice sur la cognition

1.1. Etat actuel de la recherche

L'interaction exercice-cognition a été investiguée assez tôt dans les champs de la psychologie cognitive et de la physiologie de l'exercice. En effet, dès 1973 Davey reprend le modèle du U-inversé de Yerkes et Dodson (1908), qui décrit l'interaction entre l'éveil et la performance cognitive selon un optimum, et l'applique au modèle de l'exercice physique. Le modèle du U-inversé prédit que lorsque l'éveil augmente, la performance cognitive est améliorée jusqu'à un point optimal, puis se détériore pour des niveaux d'éveil supérieurs. Davey (1973) suggère que l'exercice serait ainsi une source de stress dont l'intensité pourrait moduler le niveau d'éveil du sujet et influencer la performance cognitive selon un modèle en U-inversé. A la suite de ces premiers travaux, de nombreuses études ont tenté de valider expérimentalement le lien entre l'exercice aigu et les modifications des capacités cognitives. Néanmoins, de grandes disparités de résultats ont été recensées incluant : (i) un effet bénéfique de l'exercice sur la cognition, (ii) un changement de stratégie du sujet, (iii) une absence d'effet ou (iv) une détérioration de la performance.

En 1986, Tomporowski et Ellis (1986) dans l'une des premières revues de question sur l'interaction exercice-cognition montrent l'importance, afin d'étudier cette interaction, de contrôler un ensemble de facteurs méthodologiques. Les auteurs suggèrent qu'une même fonction pourrait être améliorée ou altérée par l'exercice selon les conditions expérimentales et notamment les caractéristiques de la tâche physique ou cognitive. Cette revue marque une réelle rupture dans le champ de la recherche et a permis aux études consécutives, sous réserve de respect de ces critères

méthodologiques, d'observer une plus grande consistance dans les résultats expérimentaux obtenus.

A la suite de cette publication princeps et depuis une vingtaine d'années, plusieurs revues de questions narratives (Brisswalter, Collardeau, et Arcelin 2002; Tomporowski 2003; McMorris et al. 2015) ou sous forme de méta-analyses (Etnier et al. 1997; Lambourne et Tomporowski 2010; Chang et al. 2012; McMorris et Hale 2012) ont montré que l'effet de l'exercice sur la performance cognitive est globalement favorable avec un effet positif mais de très faible magnitude (taille d'effet (TE) = 0,11) (Figure 1). Toutefois, il a été indiqué que cet effet est modulé par un certain nombre de facteurs méthodologiques parmi lesquels : le moment de passation et la nature de la tâche cognitive, les caractéristiques de l'exercice physique et celles des sujets.

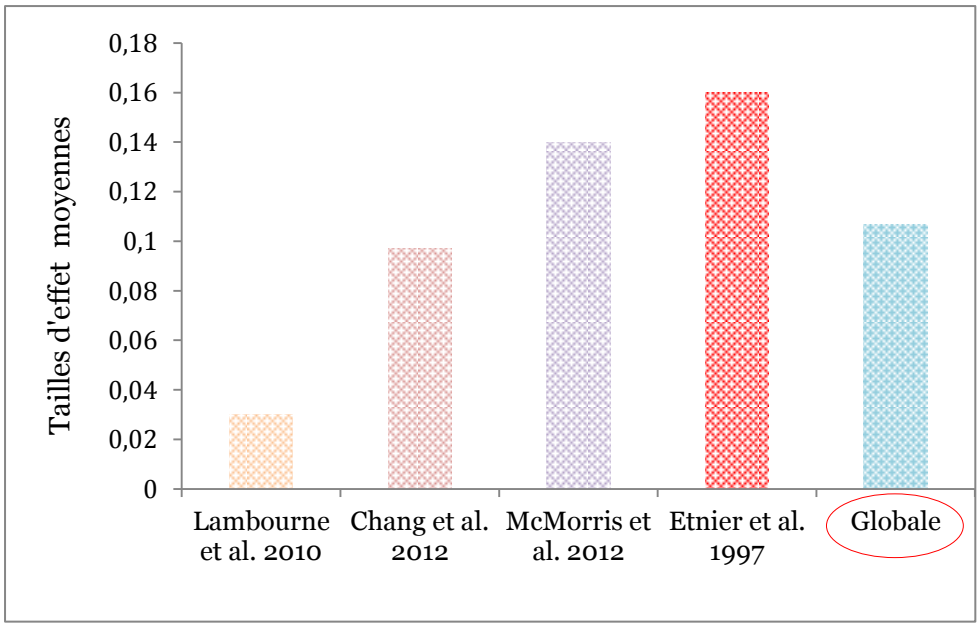

FIGURE 1 – **Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive**. Ces données sont issues de trois méta-analyses tandis que la taille d'effet « Globale » correspond à la moyenne des quatre méta-analyses. (Données issues de Etnier et al. 1997; Lambourne et Tomporowski 2010; Chang et al. 2012; McMorris & Hale 2012).

1.2. Facteurs méthodologiques d'influence de l'interaction

Moment de passation de la tâche cognitive

Dans le domaine des activités sensorimotrices, l'évaluation de la performance cognitive est classiquement réalisée lors de l'exercice, ou à la fin de celui-ci après un délai de récupération variable (post-exercice). L'effet du moment de passation est évalué de façon différenciée dans la littérature. D'une part, Chang et al. (2012) et McMorris et Hale (2012) indiquent que l'effet de l'exercice est indépendant du moment de passation. Il est décrit de magnitude faible dans l'étude de Chang et al. (2012) (pendant : TE = 0,11 ; post-exercice : TE = 0,12), ou de magnitude modérée dans la méta-analyse de McMorris et Hale (2012) (pendant : TE = 0,48 ; post-exercice : TE = 0,53). A l'inverse, Lambourne et Tomporowski (2010) indiquent un effet différentiel selon le moment de passation : il serait négatif pendant l'exercice (TE = -0,14) et positif en post-exercice (TE = 0,20). Cet effet qui est également reporté dans les revues de question narratives antérieures est expliqué par les auteurs par la différence des contraintes cognitives entre les deux conditions expérimentales (Brisswalter, Collardeau, et Arcelin 2002; Tomporowski et Ellis 1986).

En effet, lors d'une passation pendant l'exercice, le sujet est en condition de double tâche (puisqu'il doit réaliser la tâche cognitive simultanément à un exercice physique), ce qui entraîne un partage des ressources attentionnelles entre les deux tâches dîtes « primaire » et « secondaire ». Selon Kahneman (1973), il existerait une capacité attentionnelle limitée, qui devrait être répartie, entre les deux tâches réalisées simultanément. Il a été proposé que la performance de la tâche secondaire (tâche cognitive) soit dépendante de la demande attentionnelle de la tâche primaire (ici l'exercice physique) (Abernethy 1988). Classiquement cette situation de partage

des ressources attentionnelles entraine une altération de la tâche secondaire pour maintenir la performance de la tâche primaire.

En revanche, lorsque la tâche cognitive est réalisée en post-exercice, la nécessité de partage des ressources attentionnelles disparaît. Dans cette condition expérimentale, l'ensemble des travaux montre un effet de l'exercice positif qui a été décrit comme faible à modéré (TE de 0,12 à 0,53) (Lambourne et Tomporowski 2010; Chang et al. 2012; McMorris et Hale 2012). Cet effet semble être de courte durée puisqu'il est observé dans les 5 minutes suivant l'arrêt de l'exercice (McMorris et Graydon 2000; Godefroy et al. 2002).

La méta-analyse de Chang et al. (2012) suggère même qu'une altération de la performance peut être observée lorsque le délai entre la fin de l'exercice et la passation de la tâche cognitive est supérieur à 15 minutes (TE = -0,054) (Figure 2). Ces résultats ne sont cependant pas confirmés par une étude qui indique une amélioration du traitement de l'information jusqu'à 52 minutes après la fin de l'exercice modéré de 30 minutes (Joyce et al. 2009).

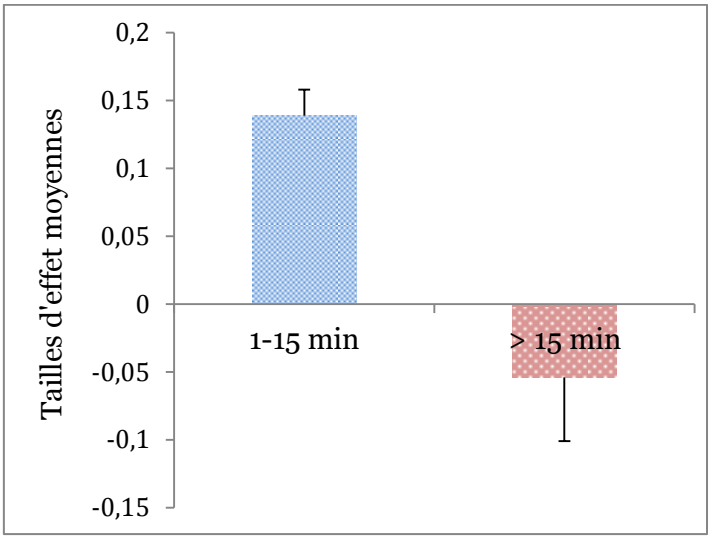

FIGURE 2 – **Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction du délai entre la fin de l'exercice et la passation de la tâche cognitive** (1-15 minutes vs supérieur à 15 minutes). Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. (Données issues de Chang et al. 2012).

Nature de la tâche cognitive

Dans la littérature récente, il est clairement indiqué que les fonctions cognitives sont distinctement impactées par l'exercice aigu (Tomporowski et Ellis 1986). Parmi la large variété de ces processus cognitifs impliqués chez l'humain, la performance dans les sports à forte composante décisionnelle (e.g., sports de raquettes, sports de combats et sports collectifs) est largement dépendante de la capacité à mettre simultanément à forte contribution les mécanismes physiologiques et les processus de prise de décision permettant l'élaboration de choix tactiques ou stratégiques.

Classiquement, dans le domaine des activités sensorimotrices, cette capacité à produire une réponse rapide sous pression temporelle est étudiée par l'intermédiaire du paradigme de la chronométrie mentale qui trouve son origine dans les travaux de Donders (1868). Lors de tâches de temps de réaction (TR), le sujet est invité à

répondre aussi rapidement et correctement que possible, par un mouvement préalablement défini, à chaque présentation d'un stimulus sensoriel donné. Le TR correspond à l'intervalle de temps entre le moment d'apparition d'un signal impératif de réponse (stimulus) et l'amorce d'une réponse motrice. Cet intervalle de temps reflète la durée de l'ensemble des étapes (ou processus) de traitement de l'information. Il constitue donc une bonne estimation de la vitesse de traitement de l'information.

Dans la littérature sur l'interaction exercice-cognition, la grande majorité des protocoles expérimentaux a manipulé deux tâches de TR : les tâches de temps de réaction simple (TRS) et les tâches de temps de réaction de choix (TRC). Dans ce premier type de tâche, le sujet connaît à l'avance le stimulus présenté ainsi que la réponse à produire : il n'existe donc aucune incertitude évènementielle puisque un stimulus unique est associé à une réponse unique. En revanche, lors d'une tâche de TRC, le sujet est soumis à la possibilité d'occurrence de plusieurs stimuli et par conséquent plusieurs réponses sont considérées comme possibles. Ce type de tâche implique des processus décisionnels réalisés sous pression temporelle.

Si le TR est une bonne estimation de la vitesse de traitement de l'information, son interprétation en chronométrie mentale est soumise au fait que la réponse doit être apportée le plus vite possible, tout en réalisant le moins d'erreur possible. Ce conflit vitesse-précision implique la nécessité d'analyser le taux d'erreur qui peut renseigner sur des éventuels changements de stratégie des sujets. En effet, le sujet peut soit décider d'augmenter sa vitesse de réponse tout en augmentant son taux d'erreur ou réciproquement, il peut augmenter sa précision mais au détriment de

l'impératif vitesse qui lui est édicté. A ce titre, le TR est donc un compromis entre la vitesse et la précision.

Dans beaucoup de disciplines sportives, la performance est aussi largement dépendante de la capacité de l'athlète à s'adapter à des situations inhabituelles, non automatisées. L'ensemble de ces fonctions, sont regroupées sous le terme de « fonctions exécutives ». Elles permettent l'adaptation du sujet à des situations nouvelles, notamment lorsque les routines d'actions c'est-à-dire les habiletés cognitives sur-apprises ne peuvent suffire. Le contrôle exécutif (aussi appelé « contrôle cognitif ») regroupe différents processus comme par exemple la capacité à inhiber une réponse prépotente (inhibition), la mise à jour des représentations de la mémoire de travail, la flexibilité mentale ou la planification (Wang et al. 2013). De façon globale, l'efficacité du contrôle cognitif s'avère être un élément essentiel de la prise de décision et de la performance sportive, et notamment le contrôle de l'interférence. En effet, un athlète est en permanence soumis à une multitude d'informations plus ou moins pertinentes. Sa performance est directement reliée à sa capacité à sélectionner les informations les plus importantes, ou à inhiber les réponses qui résulteraient de la prise en compte d'informations inappropriées.

McMorris et Hale (2012) suggèrent tout d'abord que lors de tâches de TR, la vitesse du traitement de l'information et la précision seraient distinctement impactées par l'exercice. En effet, quel que soit le moment de passation de la tâche, seul le TR est amélioré à l'exercice (effet modéré, TE = 0,30). Aucun effet n'a été montré sur la précision mesurée par le pourcentage d'erreur (non significatif (ns), TE = 0,040).

L'analyse de la littérature sur l'interaction exercice-cognition suggère aussi que l'effet de l'exercice sur le TR pourrait varier en fonction du type de tâche. Il serait modéré, mais négatif sur les tâches de TRS (TE = - 0,3) et positif sur les TRC (TE = 0,31) qui impliquent une prise de décision (Chang et al. 2012; McMorris et Hale 2012). Néanmoins, plusieurs études ont mis en évidence que l'exercice pouvait avoir un effet facilitateur sur ces deux types de tâches (Davranche et Audiffren 2004; Davranche et al. 2005, 2006).

L'effet de l'exercice sur les fonctions exécutives, semble être positif de magnitude faible (respectivement TE = 0,20 ; 0,11) (Chang et al. 2012; Lambourne et Tomporowski 2010) à forte (TE = 0,77) (McMorris et Hale 2012). De façon synthétique, cet effet peut être décrit comme positif et de magnitude modérée (TE = 0,36) (Figure 3). En revanche, les processus d'inhibition semblent être peu impactés voire même robustes à l'effet de l'exercice, et cela quelle que soit l'intensité (Davranche, Hall, et McMorris 2009; Davranche, Brisswalter, et Radel 2015; Schmit et al. 2015; Tempest et al. 2017; McMorris, Davranche et al 2009).

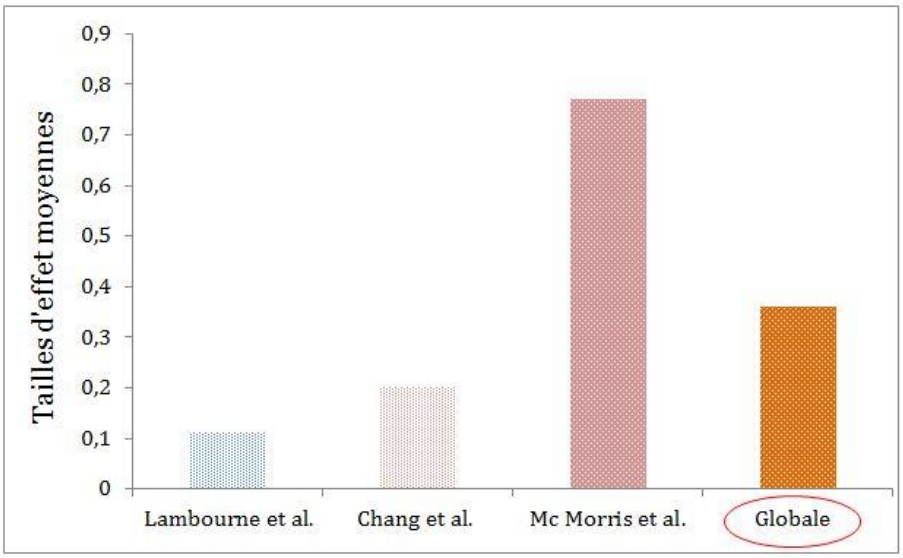

FIGURE 3 – **Tailles d'effet de l'exercice sur les fonctions exécutives issues de trois méta-analyses**. La taille d'effet « Globale » correspond à la moyenne des tailles d'effet des trois méta-analyses. (Données issues de Lambourne et Tomporowski 2010; Chang et al. 2012; McMorris et Hale 2012).

Contraintes de l'exercice physique

L'exercice physique se caractérise par son intensité, sa durée ou encore la complexité de la tâche motrice qui constituent des contraintes spécifiques pour chaque sujet.

L'intensité de l'exercice est un facteur modérateur qui a été considéré très tôt dans l'interaction exercice-cognition (Yerkes et Dodson 1908; Davey 1973). Dans deux méta-analyses, McMorris et al. indiquent que seul l'exercice d'intensité modérée (située entre 40 et 80% de la quantité maximale d'oxygène consommé ($\dot{V}O_{2max}$)) permettrait un effet positif faible (TE = 0,15) (McMorris et al. 2015), à modéré (TE = 0,50) (McMorris et Hale 2012). En revanche, ils suggèrent que l'exercice d'intensité élevée (> 80% $\dot{V}O_{2max}$) aurait un effet négatif fort (TE = -0,86) sur la performance (McMorris et al. 2015), alors que l'exercice léger (< 40% $\dot{V}O_{2max}$) n'aurait aucun effet significatif (McMorris et Hale 2012). Il semble tout de même important de préciser que ces résultats ne sont pas clairement établis puisque plusieurs études récentes ne

montrent aucune dégradation des performances lors d'un exercice d'intensité sévère (Davranche, Brisswalter, et Radel 2015) pouvant aller jusqu'à 60 minutes (Tempest et al. 2017) et conduisant parfois à l'épuisement des sujets (McMorris et al. 2009; Schmit et al. 2015).

Chang et al. (2012) suggèrent un effet d'interaction entre l'intensité de l'exercice et le moment de passation de la tâche (Figure 4). Selon les auteurs, un effet favorable de faible magnitude serait observé lorsque la tâche est réalisée pendant l'exercice pour les intensités modérées (qu'ils définissent par une fréquence cardiaque (FC) comprise entre 64-76% de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}), sévères (77-93% FC_{max}) et maximales (100% FC_{max})) (respectivement TE = 0,19 ; 0,13 et 0,14). Ce même effet serait observé en post-exercice mais pour des intensités moindres, définies comme très faibles (< 50% FC_{max}), faibles (50-63% FC_{max}) et modérées (respectivement TE = 0,15 ; 0,17 et 0,12).

En résumé, à ce jour l'analyse de la littérature fait état d'un consensus selon lequel l'exercice d'intensité modérée entraîne un effet positif de faible magnitude, et cela quel que soit le moment de passation de la tâche.

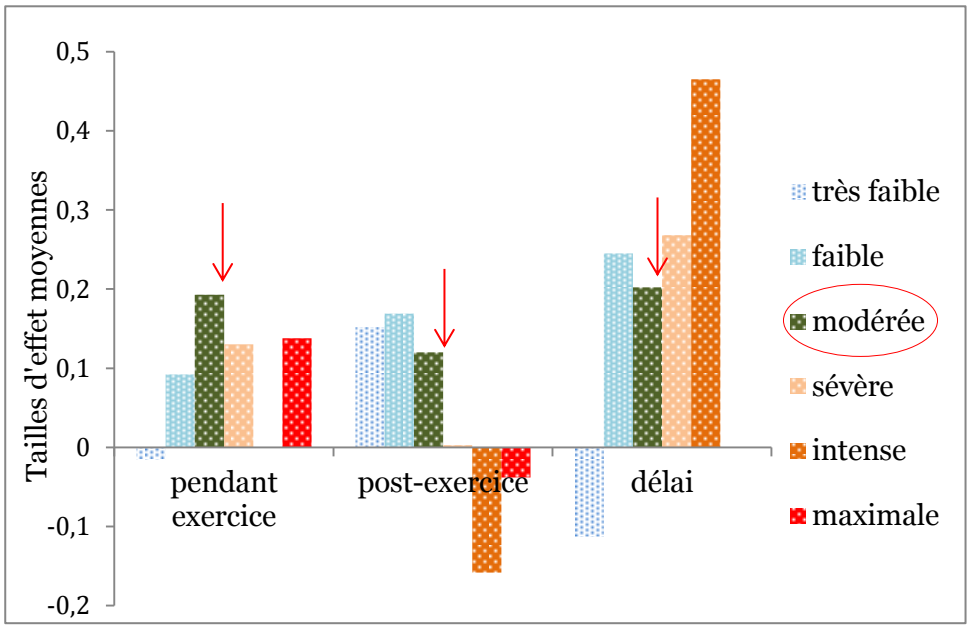

FIGURE 4 – **Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de l'intensité d'exercice et du moment de passation de la tâche** (intensité : très faible vs faible vs modérée vs sévère vs intense vs maximale ; moment de passation : pendant exercice vs post-exercice vs post-exercice avec un délai). (Données issues de Chang et al. 2012).

La seconde caractéristique de l'exercice manipulée dans l'interaction exercice-cognition est la durée. La littérature scientifique suggère qu'une durée d'exercice de minimum 20 minutes est nécessaire afin d'obtenir un effet facilitateur de magnitude faible (TE = 0,26) (Chang et al. 2012), à modérée (TE = 0,39) (Lambourne et Tomporowski 2010) (Figure 5). En revanche, lors d'un exercice de durée prolongée, plusieurs facteurs tels que la déshydratation, l'hypoglycémie, l'hyperthermie, hyperamoniémie cérébrale (Guezennec et al. 1998) ou la variation de plusieurs neurotransmetteurs et leurs rôles dans la genèse de la fatigue centrale (Acworth et al. 1986; Newsholme et Stanley 1987; Meeusen et al. 2006) peuvent altérer la performance cognitive. Néanmoins à ce jour, la validation expérimentale d'un effet d'altération de la performance cognitive lors de l'exercice prolongé a rarement été démontré (Brisswalter, Collardeau, et Arcelin 2002; Grego et al. 2005).

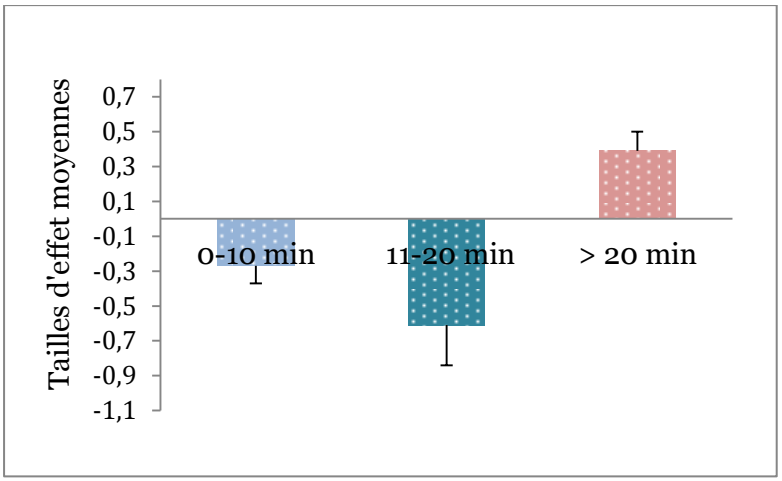

FIGURE 5 – **Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de la durée de l'exercice** (0-10 minutes vs 11-20 minutes vs supérieur à 20 minutes). Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. (Données issues de Lambourne et Tomporowski 2010).

Enfin, la complexité de la tâche motrice semble elle aussi particulièrement importante, notamment lorsque la tâche cognitive est réalisée simultanément à l'exercice. Il a été montré dans cette condition, qu'un exercice de course entraînait une forte dégradation de la performance cognitive (TE = -0,57), alors qu'un exercice de pédalage exerçait un faible effet positif (TE = 0,030) (Lambourne et Tomporowski 2010). Par ailleurs, il a aussi été suggéré qu'il existait une cadence de pédalage sur ergocycle, optimale sur le plan physiologique et cognitif, située autour de 60-80 révolutions par minute (rpm) (Brisswalter et al. 1995). L'une des explications avancées pour expliquer le rôle de la complexité du mouvement suggère une différence de coût attentionnel entre les différentes modalités. En effet, il est communément admis que la course, notamment sur tapis roulant, requière considérablement plus d'équilibre et de coordination que l'exercice de pédalage sur ergocyle (Lambourne et Tomporowski 2010). De la même façon, il a été montré que lorsque les sujets choisissaient librement une cadence, celle-ci était soit énergétiquement optimale (environ 60 rpm), soit musculairement optimale (80 rpm) tout en étant également associée à un moindre coût attentionnel (Brisswalter et al.

1995). L'hypothèse suggérée est que le choix d'une modalité d'exercice et/ou d'une cadence optimale pourrait entraîner une diminution du coût attentionnel de la tâche physique, favorisant une meilleure allocation des ressources attentionnelles vers la tâche cognitive. La performance cognitive serait donc améliorée.

Ceci s'illustre dans le fait que lorsque la tâche cognitive est réalisée en post-exercice, l'effet de l'exercice reste positif et modéré quelle que soit soit la modalité d'exercice (course : TE = 0,12 ; vélo : TE = 0,23) (Lambourne et Tomporowski 2010) (Figure 6).

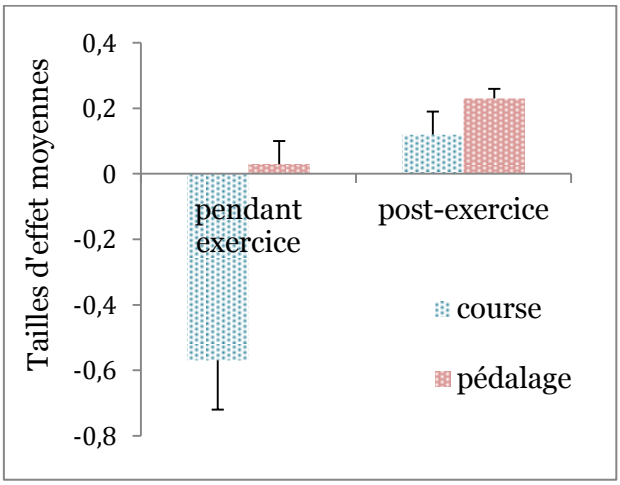

FIGURE 6 – **Tailles d'effet de l'exercice sur la performance cognitive en fonction de la modalité d'exercice et du moment de passation de la tâche cognitive** (modalité : course vs pédalage ; moment de passation : pendant exercice vs post-exercice). (Données issues de Lambourne et Tomporowski 2010).

Caractéristiques des sujets

La principale caractéristique des sujets, connue pour moduler à la fois la direction et l'amplitude des effets obtenus, est le niveau de condition physique. Il est défini à partir des caractéristiques du métabolisme aérobie (i.e., $\dot{V}O_{2max}$) (Chodzko-Zajko 1991). Par exemple, Brisswalter et al. (1997) indiquent que les performances cognitives des sujets ayant une faible condition physique ($\dot{V}O_{2max}$ = 42.2 ± 3.0

ml.min.kg^{-1}) sont significativement inférieures à celles de sujets entraînés ($\dot{V}O_{2max}$ = 64.1 ± 2.3 ml.min.kg^{-1}), et cela quelle que soit l'intensité d'exercice. Plus récemment Chang et al. (2012) ont suggéré que seuls les sujets entraînés présentaient un effet d'exercice positif faible quel que soit le moment de passation de la tâche cognitive (sujets entraînés : pendant exercice TE = 0,23 ; post-exercice TE = 0.28 vs sujets faibles conditions physiques : pendant exercice TE = -0,42 ; post-exercice TE = 0,24). Selon les résultats de cette méta-analyse, les sujets de faibles conditions physiques et ceux de conditions physiques moyennes peuvent présenter un effet d'exercice favorable, mais seulement lorsque la tâche cognitive est réalisée en post-exercice (Figure 7).

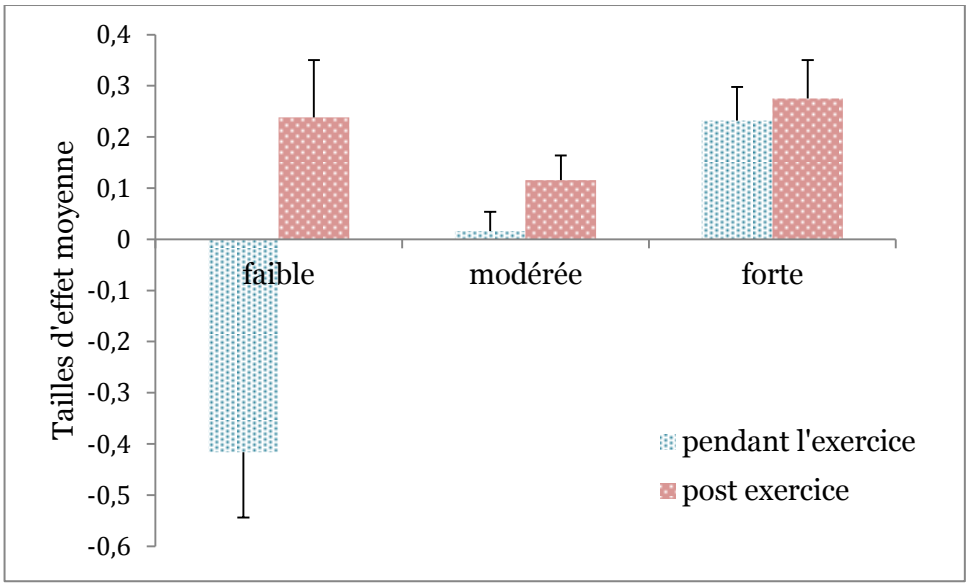

FIGURE 7 – **Tailles d'effet de l'exercice sur les performances cognitives en fonction de la condition physique des sujets et du moment de passation de la tâche cognitive** (condition physique : faible vs modérée vs forte ; moment de passation : pendant exercice vs post-exercice). Les barres d'erreurs représentent les erreurs standard. (Données issues de Chang et al. 2012).

Par ailleurs, il a été aussi montré qu'à des niveaux de condition physique égaux, les athlètes experts des disciplines de prise de décision tels que les sports d'opposition, de combat ou de raquettes sont capables d'améliorer leur performance cognitive à des intensités hautes (> 80% puissance maximale aérobie, PMA) alors qu'une détérioration de la performance survient fréquemment chez des individus non experts (Delignières, Brisswalter, et Legros 1994).

EN RESUME

De façon synthétique, l'analyse de la littérature scientifique (Figure 8) met en évidence que :

- L'exercice aigu, d'intensité modérée et de durée supérieure à 20 minutes, entraîne un effet positif et de faible magnitude. En revanche, lors de durée prolongée (supérieure à 2 heures), l'apparition d'une hypoglycémie, d'une hyperthermie ou d'une déshydratation pourrait détériorer la performance cognitive.

- La vitesse de traitement de l'information semble être favorablement impactée par l'exercice physique. L'effet sur les fonctions exécutives semble être très hétérogène selon la fonction investiguée. Spécifiquement, il semble que les processus d'inhibition soient robustes à l'effet de l'exercice.

- En situation de double tâche pendant l'exercice, les résultats de la littérature indiquent un effet global positif sur les tâches décisionnelles et négatif sur les tâches de TRS. Néanmoins ces effets ne sont pas retrouvés dans l'ensemble des études, et ils semblent varier en fonction de l'importance de la contrainte attentionnelle de la tâche physique.

- La nature de l'exercice physique semble peu influente lorsque tâche cognitive est réalisée en post-exercice. Néanmoins, le délai entre la fin de

l'exercice et la passation de la tâche cognitive doit être le plus court possible pour maintenir l'effet favorable de l'exercice.

- Enfin les sujets entraînés avec une forte aptitude aérobie et experts des disciplines qui impliquent de nombreuses prises de décisions, sont ceux chez qui l'effet positif de l'exercice est le plus important.

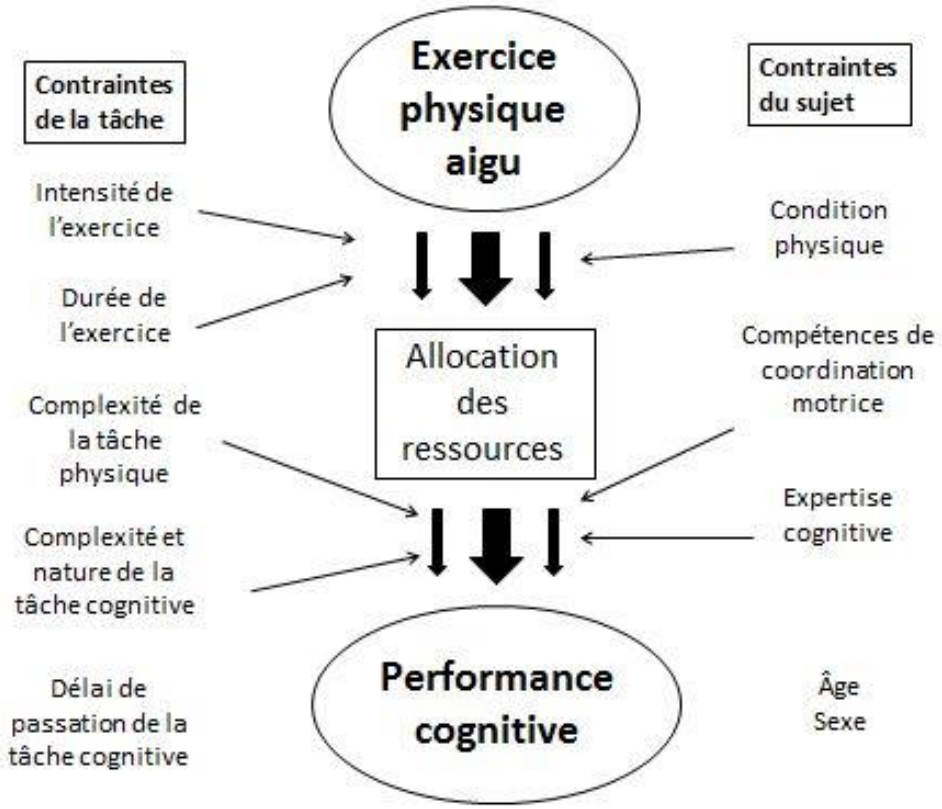

FIGURE 8 – **Représentation schématique des effets individuels et des contraintes des tâches (tâche cognitive et tâche physique) sur la relation entre exercice aigu et cognition.** (D'après Pesce 2009).

II – Amélioration de la cognition lors de l'exercice : hypothèses explicatives

2.1. Exercice et éveil

L'hypothèse principale avancée pour expliquer l'amélioration des processus cognitifs lors, ou à la suite de l'exercice physique aigu, repose sur une augmentation du niveau d'éveil induite par l'exercice physique (Cooper 1973; Chmura, Nazar, et Kaciuba-Uściłko 1994). Le concept d'éveil est défini comme un état général d'activité du système nerveux central qui pourrait être régulé, dans une certaine mesure, par des facteurs environnementaux et par la demande de la tâche (Robbins 1997).

Dès la fin de l'exercice, une augmentation du niveau d'éveil a été mise en évidence ces 15 dernières années, par plusieurs équipes qui ont utilisé la technique de l'électroencéphalographie (EEG) et des potentiels évoqués cérébraux afin de mesurer l'effet de l'exercice sur les processus informationnels (pour revue voir Chang 2016). Les potentiels évoqués cérébraux sont des modifications transitoires de la tension des courants engendrés par le tissu cérébral, qui précédent ou suivent la présentation d'un stimulus sensoriel. Ils sont caractérisés par leur polarité (positive ou négative), leur latence et leur amplitude. Il a été proposé que le niveau d'éveil module certains paramètres des potentiels évoqués.

L'une des premières ondes étudiées en lien avec le niveau d'éveil est la variation contingente négative (VCN). Cette onde négative est classiquement observée en anticipation d'un évènement. Il a été proposé que la composante précoce de cette onde, qui apparaît dans la région frontale et semble impliquée dans l'orientation de la réponse (Kamijo et al. 2004), soit reliée au niveau d'éveil. Ainsi, l'amplitude de la VCN augmenterait linéairement à l'augmentation du niveau d'éveil

jusqu'à un summum, avant de diminuer pour une plus grande augmentation du niveau d'éveil (Walter et al. 1964). Néanmoins en raison de sa difficulté à être mise en évidence, cette onde a été relativement peu utilisée lors de l'exercice. Dans l'une des rares études utilisant la VCN, Kamijo et al. (2004) ont étudié l'effet de trois intensités d'exercice (légère, modérée et sévère) ainsi que d'une condition contrôle au repos, lors d'une tâche de Go/Nogo qui contenait un signal préparatoire suivi d'un signal impératif. Les résultats de cette étude suggèrent une tendance à l'augmentation, bien que non significative, de l'amplitude de la VCN pour une intensité modérée comparée à la condition de repos. Les résultats indiquent également qu'un exercice sévère entraîne une diminution significative de l'amplitude de la VCN comparé à une intensité modérée.

La P300 est sans doute le potentiel évoqué qui a été le plus étudié notamment en raison de sa facilité de détection. Cette onde positive de forte amplitude, apparaît approximativement 300 millisecondes (ms) après l'apparition du stimulus. Il a été proposé que les caractéristiques de cette onde puissent fluctuer en fonction des modifications transitoires du niveau d'éveil des sujets (Polich et Kok 1995). L'amplitude de la P300 est souvent considérée comme un reflet de la quantité de ressources attentionnelles allouées à la tâche tandis que la latence est associée à la vitesse de détection et d'évaluation du stimulus (Polich 2007). A notre connaissance, 15 études ont investigué l'effet de l'exercice sur cette onde, pendant ou à la fin de celui-ci. Dix d'entre elles indiquent une augmentation de l'amplitude de l'onde P300 interprétée comme une augmentation des ressources attentionnelles allouées à la tâche (Drollette et al. 2014; Hillman et al. 2009; Hillman, Snook, et Jerome 2003; Kamijo et al. 2004, 2007, 2009; Magnié et al. 2000; Nakamura et al. 1999; Pontifex

et al. 2013; Scudder et al. 2012). Concernant la latence de l'onde P300, 6 études indiquent une diminution, qui peut être considérée comme une amélioration de la vitesse de détection et d'évaluation du stimulus (Magnié et al. 2000; Hillman, Snook, et Jerome 2003; Kamijo et al. 2007, 2009; Hillman et al. 2009; Pontifex et al. 2013).

Compte tenu de la difficulté expérimentale du recueil de mesures électroencéphalographiques lors de l'exercice physique (Thompson et al. 2008), l'élévation du niveau d'éveil au cours d'une sollicitation physiologique est le plus souvent suggérée dans la littérature scientifique de façon indirecte, par plusieurs mesures comportementales.

Un paradigme ancien dans le domaine de la physiologie environnementale (Seki et Hugon 1976) repose sur la détermination du seuil de Fréquence Critique de Fusion (FCF). Cet indice a été plus récemment utilisé lors de l'exercice. La FCF est une tâche de discrimination visuelle où cours de laquelle le sujet est soumis à une difficulté de jugement sensoriel (Powell 1982). Basée sur la détermination du changement de fréquence d'un signal visuel, la FCF est aussi considérée comme un indice de l'activité du système nerveux central et un reflet indirect du niveau d'éveil cortical (Smith et Misiak 1976). Lors de cette tâche, il est demandé aux sujets d'appuyer sur un bouton de réponse lorsque deux signaux visuels identiques deviennent fusionnés, et lorsque ces points fusionnés deviennent une lumière vacillante. Alternativement, la fréquence de clignotement des stimuli visuels, située sur une amplitude de 0 à 100 hertz (Hz), évolue soit dans le sens augmentation (fréquence ascendante), soit celui d'une diminution (fréquence descendante). Un indice de sensibilité sensorielle (M_{tot}) est calculé par la moyenne de six essais consécutifs. Il est communément admis qu'une augmentation de cet indice reflète

une amélioration des processus sensoriels et une augmentation du niveau d'éveil cortical (et inversement) (Li et al. 2004). En revanche cette interprétation n'est vraie que si et seulement si aucune modification stratégique n'est réalisée par le sujet. Pour cela, un autre indice appelé critère de jugement sensoriel (M_{di}), est calculé par la différence entre les seuils ascendants et descendants. Une augmentation de M_{di} traduit une modification de la stratégie de discrimination du sujet vers un mode conservateur (i.e., observateur prudent) alors qu'une diminution de M_{di} traduit une augmentation de la prise de risque du sujet (i.e., observateur libéral). Plusieurs protocoles expérimentaux ont montré une augmentation de l'indice M_{tot} sans modification de l'indice $M_{di,}$ durant l'exercice (Lambourne, Audiffren, et Tomporowski 2010) ou à la fin de celui-ci (Davranche et Audiffren 2004; Davranche et al. 2005; Davranche et Pichon 2005; Presland, Dowson, et Cairns 2005) suggérant ainsi une augmentation du niveau d'éveil. Seules deux études ayant utilisé cette technique (Godefroy et al. 2002; Grego et al. 2005) évoquent un changement de stratégie des sujets (diminution de l'indice M_{di}), vers un mode plus libéral respectivement à la fin d'un exercice de 60 minutes et à partir de 120 minutes d'exercice.

Plus récemment, le paradigme du traitement temporel issu de la psychologie du temps, a également été utilisé afin d'identifier les modifications du niveau d'éveil (Burle et Casini 2001; Casini et al. 2013). Ce paradigme est basé sur le modèle de l'horloge interne proposé par Treisman en 1963, puis repris par Gibbon, Church, et Meck sous forme de la théorie du « temps scalaire » en 1984. A ce jour, cette théorie est sans doute la plus influente dans le domaine de la psychologie du temps. Elle suggère que le traitement temporel est le fruit de tout un système, composé de

différents modules en interconnexion. Parmi ces modules, la base de temps (aussi appelée « pacemaker ») est impliquée dans la mesure des intervalles grâce à l'émission régulière de pulsations qui sont stockées dans un accumulateur. Plus la vitesse de la base de temps s'accélère, plus le nombre d'impulsions accumulées est important, et plus longue est la durée subjective estimée. Il a été proposé que cette vitesse d'émission des impulsions par la base de temps soit influencée par des stimuli externes ou internes, tels que des clics auditifs ou visuels (Penton-Voak et al. 1996), ou la variation de la température corporelle (Wearden et Penton-Voak 1995). En psychologie du temps, il existe aujourd'hui un consensus selon lequel plus les stimulations extérieures sont stimulantes et entraînent un éveil spécifique, plus la vitesse de la base de temps s'accélère entraînant une surestimation temporelle (Droit-Volet et Wearden 2003).

A notre connaissance une seule étude (Lambourne 2012) a investigué l'effet de l'exercice aigu sur le jugement temporel. Au cours de ce protocole, une tâche de généralisation temporelle (Jones et Wearden 2004), qui consiste à présenter aux sujets deux gammes de durées respectivement de 300 et 600 ms sous la forme d'un stimulus visuel était réalisée. Il était demandé aux sujets lors d'une phase d'apprentissage de mémoriser ces « durées standards », puis lors d'une phase de test, de classer des stimuli visuels dont la durée était aléatoirement répartie autour d'une des deux « durées standards » (4 durées inférieures et 4 durées supérieures à la durée standard). Ainsi, après chaque présentation du stimulus visuel, les sujets devaient répondre oralement, par « oui » ou « non » à la question « Est-ce que la durée présentée est égale à la durée standard préalablement apprise ? ».

Les résultats suggèrent que quelle que soit la gamme de durée présentée (300 ms ou 600 ms), la proportion de réponse « oui » augmente pour les durées

présentées plus courtes que la durée standard. Au contraire, celle-ci diminue pour les durées présentées plus longues que la durée standard. L'interprétation de ces résultats suggère que la stimulation de l'exercice entraîne une surestimation temporelle, classiquement interprétée en psychologie du temps comme une augmentation du niveau d'éveil cortical. Ainsi, l'exercice affecte la performance du jugement temporel de la même façon que les autres manipulations stimulantes i.e., dans le sens d'une accélération de la vitesse de la base de temps.

2.2. Neuromodulation de l'éveil

Très tôt, Cooper (1973) met en relation les modifications du niveau d'éveil lors de l'exercice et l'augmentation de la concentration de catécholamines plasmatiques (principalement noradrénaline (NA)). En effet, lors de l'exercice physique, ou selon le contexte avant son initiation, l'hypothalamus initie l'axe sympathoadrénergique qui entraîne la libération de catécholamines par la glande médullo-surrénale. Cette structure est responsable de la libération plasmatique de 80 % de l'adrénaline (A) et de 20 % de NA, tandis que près 80 % de la NA est sécrétée par les neurones sympathiques post-ganglionnaires.

Dans les premières études, les données expérimentales recueillies chez l'animal ont conduit Cooper (1973) à suggérer que lors d'une forte concentration de catécholamines plasmatiques et seulement dans ce cas, la barrière hémato-encéphalique deviendrait perméable à ces neurohormones, permettant l'augmentation de leur concentration dans la formation réticulée et entraînant un effet sur le niveau d'éveil. Néanmoins, si plusieurs travaux rapportent une concomitance entre les libérations de catécholamines plasmatiques et cérébrales (pour revue voir McMorris 2016), à ce jour les données actuelles recueillies chez

l'animal démontrent que la barrière hémato-encéphalique reste imperméable aux catécholamines plasmatiques, et cela quelles que soient leurs concentrations (Kostrzewa 2007).

Ainsi, il a été proposé que les effets de l'exercice sur l'élévation du niveau d'éveil soient médiés par plusieurs zones cérébrales et notamment le tronc cérébral. Cette structure regroupe un amas de corps cellulaires de neurones, qui sont impliqués dans deux fonctions principales. La voie ascendante, aussi appelée le « système réticulaire activateur ascendant », possède un rôle important pour l'activation corticale et projette vers le thalamus, l'hypothalamus, le cortex et le cerveau antérieur basal. Le « système réticulaire activateur descendant » projette vers la moelle épinière et possède un rôle primordial pour le maintien du tonus musculaire (Lee et Dan 2012).

Le système réticulaire activateur ascendant contient différents systèmes modulateurs, qui diffèrent par leurs structures anatomiques, leurs fonctions et par les neurotransmetteurs utilisés (Robbins 1997), mais possèdent tous une fonction globale de régulation. En effet, ils sont connus pour moduler l'activité de grandes populations de neurones afin de les rendre plus ou moins excitables ou d'augmenter/diminuer la synchronisation de leurs actions. Cette structure contient plusieurs neuromodulateurs essentiels tels que les monoamines incluant les catécholamines dopamine (DA) et noradrénaline, la sérotonine (Chaouloff 1989; Meeusen et de Meirleir 1995) ainsi que l'histamine et l'acétylcholine (Lee et Dan 2012). Il a été proposé que tous ces neurones déchargent fortement pendant les états de veille et ralentissent voire s'arrêtent de décharger pendant le sommeil léger ou

profond. Ainsi, les systèmes modulateurs subcorticaux ont un effet significatif sur la régulation de l'éveil mais sont aussi impliqués dans l'attention, l'humeur et la cognition. Il est aujourd'hui admis que l'activité de ces neuromodulateurs est largement influencée par des facteurs psychologiques et physiologiques (Sara et Bouret 2012). A ce jour, l'activité du système noradrénergique et des systèmes dopaminergiques localisés respectivement dans le tronc cérébral semblent d'importance pour expliquer les modifications des processus cognitifs et attentionnels (Nieoullon 2002; Sara et Bouret 2012; Lee et Dan 2012).

L'intégralité des neurones noradrénergiques sont localisés dans une structure du pont de Varole appelée le « locus coeruleus ». Les axones issus de ces noyaux forment plusieurs faisceaux, puis se dispersent et innervent tous les autres noyaux neuromodulateurs, mais aussi une grande partie du cerveau incluant l'ensemble du cortex cérébral, le thalamus, l'hypothalamus, le cervelet, le mésencéphale, le bulbe olfactif et la moelle épinière (Cooper 1973) (Figure 9). Il a été proposé que ses projections sur le thalamus et les cortex sensoriels influencent les processus sensoriels dans toutes les modalités, tandis que les études chez l'animal ont montré le rôle essentiel joué par les projections du locus coeruleus vers le cortex préfrontal (CPF) dans la régulation des processus cognitifs complexes (Sara et Bouret 2012).

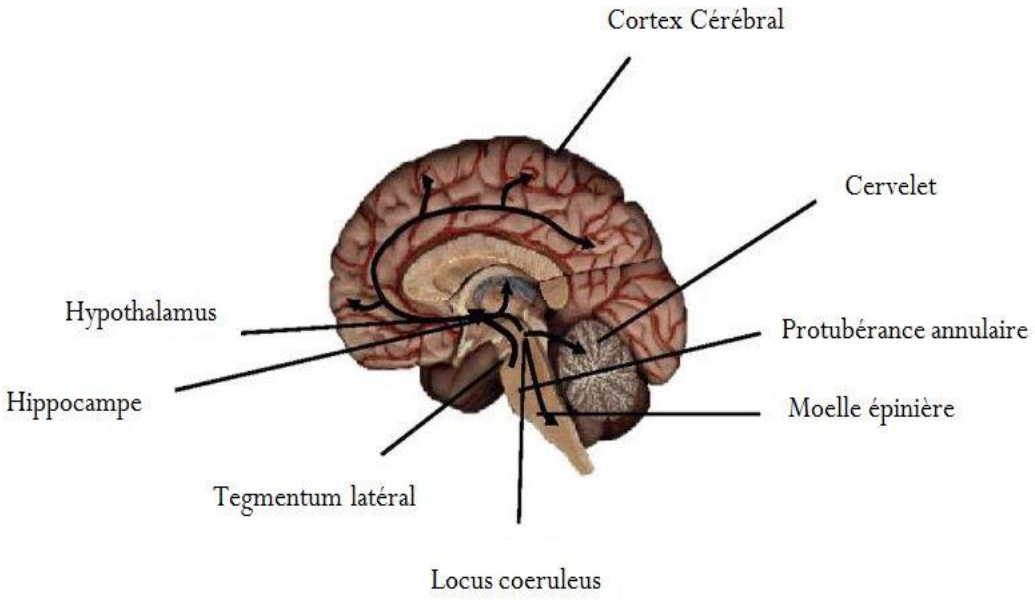

FIGURE 9 – **Représentation schématique des projections de la voie noradrénergique** (Issu de Mc Morris 2016).

A ce jour, si les projections de cette structure ont été largement investiguées, les structures qui contrôlent l'activité de ces neurones restent l'objet de controverses. En plus des afférences provenant de l'ensemble des autres noyaux neuromodulateurs du tronc cérébral, il semblerait que l'hypothalamus et l'amygdale projettent vers le locus coeruleus. Par ailleurs, cette structure reçoit aussi des afférences de la Xème paire de nerfs crâniens (nerfs pneumogastriques) qui transmet l'information du système nerveux autonome via le noyau du faisceau solitaire. Enfin, il a été proposé que le CPF projette aussi sur le locus coeruleus et représente la seule afférence corticale directe sur cette structure (pour revue voir Sara et Bouret 2012).

Le système dopaminergique est régi par deux noyaux du mésencéphale : « l'aire tegmentale ventrale » et la « substance noire ». Les axones des neurones dopaminergiques issus de la substance noire projettent vers la partie dorsale et ventrale du striatum, qui constitue la voie « nigrostriée ». Cette structure module à

son tour l'activité dans un large réseau impliquant le thalamus, l'aire motrice supplémentaire (AMS), le cortex pré-moteur et le cortex moteur primaire. Par ailleurs les neurones dopaminergiques issus de l'aire tegmentale ventrale projettent aussi vers le système limbique et plusieurs régions corticales, notamment le cortex frontal et constituent la voie « mésocorticolimbique » (Bear, Connors, et Paradiso 2007) (Figure 10). Il a été proposé que la dopamine soit largement impliquée dans le contrôle de la motricité (Nieoullon 2002; Hasbroucq et al. 2003) ainsi que dans les processus de motivation, de récompense et de renforcement par son action sur le système limbique. Par ailleurs, le système dopaminergique serait aussi impliqué dans l'estimation temporelle, les fonctions exécutives (Nieoullon 2002) ainsi que dans des processus de détection sensoriel (Rihet et al. 2002).

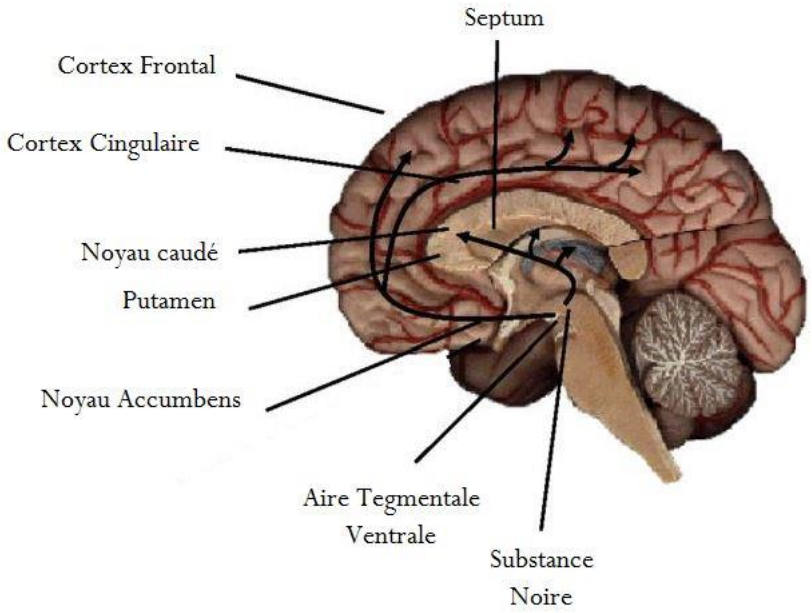

FIGURE 10 – **Représentation schématique de la voie dopaminergique** (Issu de Mc Morris 2016).

2.3. Exercice et neuromodulateurs cérébraux

Plusieurs hypothèses ont été émises concernant la libération de NA cérébrale au cours de l'exercice. D'une part, il a été proposé que la libération de NA plasmatique active les récepteurs β-adrénergiques des nerfs pneumogastriques qui, via la stimulation du noyau du faisceau solitaire, entraînent la libération de NA dans le locus coeruleus. Il semblerait qu'en raison des nombreuses connexions entre les systèmes neuromodulateurs, la libération de NA dans le locus coeruleus favorise consécutivement la libération de DA dans l'aire tegmentale ventrale (McMorris 2016; McMorris et Hale 2012).

Par ailleurs, l'hypothalamus en réponse aux différentes afférences sensorielles liées à l'exercice (stress cardio-vasculaire, déplétion glycogénique, douleur…) (McMorris et Hale 2012; Pliszka, McCracken, et Maas 1996), au stress psychologique induit par l'enjeu lié à l'exercice (e.g., compétition), à la perception de difficulté de la tâche et/ou la crainte de ne pas posséder les ressources nécessaires à sa réalisation, pourrait directement augmenter la synthèse et la libération de noradrénaline dans le locus coeruleus (McMorris et al. 2009).

Enfin, il a aussi été suggéré un lien direct entre l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HHS) et la libération de catécholamines cérébrales. La stimulation de l'axe HHS à l'exercice (responsable de la libération de cortisol par la glande corticosurrénale) est rapportée lors de l'exercice intense (> 80% PMA) (McMorris et al. 2009) ou de durée supérieure à 45 minutes (Bridge et al. 2003). Par ailleurs, il a été suggéré que chez des populations particulières telles que les personnes sédentaires, cet axe pouvait être stimulé avant même le début de l'exercice (McMorris

et al. 2009). L'augmentation de la concentration de corticolibérine (CRF) libérée par le système hypothalamo-hypophysaire, augmente l'activité neuronale du locus coeruleus facilitant ainsi la libération de NA dans cette structure (Asbach, Schulz, et Lehnert 2001). D'autre part, certaines données expérimentales semblent confirmer le lien entre réaction au stress physiologique et libération de DA dans le striatum. Chez l'humain sain, une corrélation positive a été trouvée entre le taux de cortisol salivaire induit par un stress psychologique et la concentration de DA dans le striatum ventral (ou noyau accumbens) (Pruessner 2004). Le cortisol, qui franchit facilement la barrière hémato-encéphalique pourrait donc posséder un effet facilitateur sur l'activation des neurones dopaminergiques, facilitant ainsi la libération et la diffusion de DA par le système nigrostrié.

2.4. Neuromodulateurs, exercice et cognition : validation expérimentale

Plusieurs études ont tenté de valider expérimentalement le lien entre libération de catécholamines cérébrales pendant l'exercice et amélioration des processus cognitifs. La principale difficulté transversale à ces études réside dans la complexité de mesure directe des variations de catécholamines cérébrales chez l'humain. Les techniques utilisées sont donc des mesures indirectes, basées sur la quantification des taux de variations de catécholamines plasmatiques qui sont considérés comme concomitants aux valeurs cérébrales, ou dans les mesures de leurs métabolites, estimées comme plus précises.

Dans l'étude pionnière sur cette thématique, Chmura Nazar et Kaciuba-Uściłko (1994) ont mis en relation les changements de performance lors d'une tâche de TRC, réalisée simultanément à un exercice de pédalage incrémenté jusqu'à épuisement, et

les taux de catécholamines plasmatiques. Les résultats expérimentaux indiquent d'une part l'existence d'une augmentation concomitante de la concentration de NA et A plasmatique et l'intensité de l'exercice. D'autre part, les auteurs montrent que la performance de TRC suit une courbe en U-inversé : la performance s'améliore avec l'augmentation de l'intensité jusqu'à une valeur optimale, située autour de 75% $\dot{V}O_{2max}$, tandis qu'une élévation additionnelle de l'intensité entraîne une détérioration du TR. Dans une seconde étude du groupe (Chmura et al. 1998), les auteurs ont investigué l'effet de deux exercices d'intensités et de durées différentes (respectivement 20 minutes au seuil lactique[1] + 10% vs 60 minutes à 70% du seuil lactique) sur la performance d'une tâche de TRC et la variation de catécholamines plasmatiques. Les résultats indiquent une diminution du TR pour les deux intensités comparées aux valeurs de repos. Pour l'exercice intense de 20 minutes, une corrélation négative est indiquée entre le TR et la concentration de A et NA plasmatique : plus la concentration de catécholamines augmente, et plus le TR diminue. En revanche ce résultat n'est pas retrouvé pour l'exercice modéré de durée prolongée. En effet, le taux de catécholamines augmente rapidement pour se stabiliser dès 20 minutes d'exercice tandis que le TR diminue jusqu'à un palier situé à 40 minutes avant de se stabiliser jusqu'à la fin de l'exercice. Même si nous ne pouvons statuer sur l'amélioration du traitement de l'information, notamment en raison d'une absence d'analyse du taux d'erreur, cette étude a été la première à suggérer une corrélation négative entre le TR et le taux de catécholamines périphériques.

[1] Le seuil lactique est considéré comme l'intensité à laquelle le lactate commence à s'accumuler dans le plasma sanguin. Il est peut être définie par la mesure de l'intensité d'exercice pour laquelle : (i) le lactate atteint la valeur de 4 $mmol.l^{-1}$; (ii) la première inflexion de la courbe représentant le lactate en fonction de la charge de l'exercice apparaît (Beaver, Wasserman, et Whipp 1985).

Plusieurs études ont été menées par Mc Morris et al. (1999, 2000, 2003, 2008) dans l'objectif de confirmer cette hypothèse. Malgré une augmentation significative des catécholamines plasmatiques au cours de l'exercice, les résultats de ces études diffèrent entre eux. En effet, les effets de l'exercice sur le TR sont décrits comme facilitateurs quelle que soit l'intensité (McMorris et al. 1999), facilitateurs seulement pour une intensité maximale (McMorris et al. 2003), ou nuls (McMorris et Graydon 2000). Il a donc été proposé que le taux de catécholamines plasmatiques ne soit pas un indicateur fiable et systématique des modifications du TR (McMorris et al. 2003).

Dans une étude plus récente, Mc Morris et al. (2008) ont évalué si la réalisation de tâches cognitives au cours d'un exercice était associée à une augmentation de l'utilisation de NA et DA cérébrale. Les auteurs ont formulé l'hypothèse qu'au cours de l'exercice, une augmentation de la libération de NA et DA cérébrale avait lieu et était disponible pour la réalisation de la tâche cognitive (Cooper 1973; Chmura, Nazar, et Kaciuba-Uściłko 1994). A ce titre, ils ont décidé de mesurer la concentration plasmatique des métabolites de la NA et DA, respectivement le 3-methoxy 4-hydroxyphenylglycol (MHPG) et l'acide homovanillique (HVA), qui sont considérés comme des meilleurs indices de l'utilisation des neurotransmetteurs NA et DA dans le cerveau que les mesures de catécholamines plasmatiques elles-mêmes. Ainsi les sujets étaient soumis à 4 conditions expérimentales au cours desquelles ils devaient pédaler 6 minutes sur ergocycle, à une intensité fixée à 40% et 80% de leur PMA. Ces valeurs cibles ont été choisies car elles se situent respectivement au-dessous et dessus du seuil adrénergique et cela quelle que soit la condition physique des sujets (Deuster et al. 1989). Dans deux de ces conditions les sujets devaient réaliser simultanément au pédalage, une tâche de TRC à 4 éventualités ainsi qu'une tâche de génération aléatoire de nombre, qui implique la mémoire de travail

(condition « exercice plus cognition »). Dans les deux autres conditions, les sujets devaient seulement réaliser l'exercice physique de pédalage (condition « exercice seul »). Les auteurs postulent qu'une variation des concentrations de métabolites entre les conditions « exercice seul » et « exercice plus tâche cognitive » serait due à une activité centrale qui pourrait être prédictive des performances de la tâche cognitive. En effet, selon eux, les tâches cognitives impliquant les fonctions exécutives seraient particulièrement dépendantes des voies dopaminergiques et noradrénergiques.

Les résultats de cette étude montrent d'une part que l'exercice à 80% PMA entraîne une augmentation significative du TR comparé à la condition de repos et à 40% PMA. Ce résultat n'est pas en adéquation avec les données actuelles de la littérature qui suggèrent un effet bénéfique de l'exercice sur le traitement de l'information. Néanmoins cette dégradation est compensée par une diminution significative du temps de mouvement comparée aux deux autres conditions. Aucun effet n'est observé sur l'efficacité de la mémoire de travail. Par ailleurs, malgré une élévation de la concentration de MHPG et HVA plasmatique simultanée à l'élévation de l'intensité d'exercice, celle-ci ne diffère pas entre les conditions « exercice seul » et « exercice plus cognition ». Il semblerait donc que l'augmentation de l'activité noradrénergique et dopaminergique soit seulement due à l'exercice lui-même et non à la sollicitation cognitive. Le faible échantillon (n = 12) de la population ainsi que leurs faibles niveaux de condition physique sont des explications potentielles à ces résultats incertains.

Ainsi à ce jour, l'hypothèse catécholaminergique ne permet pas à elle seule d'expliquer les effets bénéfiques de l'exercice sur les performances cognitives.

EN RESUME

L'ensemble des protocoles expérimentaux ayant investigué l'effet de l'exercice à travers l'utilisation d'outils comportementaux ou électrophysiologiques, confirment une augmentation du niveau d'éveil induit par l'exercice aigu.

Ce mécanisme d'éveil est médié par un ensemble de systèmes modulateurs répartis tout au long du tronc cérébral, regroupés sous le terme de système réticulaire activateur ascendant. Par ses projections diffuses sur l'ensemble du cortex, le système noradrénergique du locus coeruleus semble particulièrement impliqué dans le traitement de l'information ainsi que dans les fonctions exécutives.

A ce jour, la variation de catécholamines plasmatiques lors de l'exercice est clairement connue et décrite. Néanmoins, les recherches expérimentales ayant tenté de valider l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de la concentration de catécholamines plasmatiques expliquerait l'amélioration du fonctionnement cognitif à l'exercice présentent des résultats équivoques.

Pour l'heure, très peu d'études ont validé expérimentalement le lien entre l'augmentation de la concentration de catécholamines cérébrales et l'amélioration de la performance cognitive au cours d'un exercice.

III – Localisation des effets de l'exercice sur le traitement de l'information sensorimotrice

3.1. Décomposition globale des activités sensorimotrices

Les méthodes appliquées pour localiser l'influence de l'exercice sur la chaîne de traitement de l'information sont basées sur une décomposition globale des activités sensorimotrices. Selon Donders (1868), le traitement de l'information sensorimotrice est constitué d'une séquence « d'opérations », de « stades », « d'étapes » ou de « processus » de durées indépendantes, depuis l'apparition du stimulus jusqu'à l'amorce de la réponse motrice. Chaque stade reçoit une représentation en entrée, qui est transformée avant d'être transférée sous la forme d'une représentation de sortie. Les travaux de Luce (1986) et Sanders (1998) ont permis de distinguer au sein du traitement de l'information des étapes dîtes *périphériques* et des étapes dîtes *centrales*.

Les étapes *périphériques*, qui sont réalisées par le système nerveux périphérique, regroupent l'étape sensorielle impliquée dans la détection du stimulus, ainsi que l'étape d'exécution de la réponse motrice engagée dans la transmission de l'influx nerveux du cortex moteur aux muscles effecteurs. Les étapes *centrales* du traitement de l'information, englobent l'ensemble des processus intermédiaires aux étapes sensorielles et motrices, réalisées par le système nerveux central. Si la distinction entre les étapes *périphériques* et *centrales* est indépendante de la tâche réalisée par le sujet, en revanche le nombre d'étapes *centrales* dépend de l'incertitude événementielle de la tâche.

Cette allégation peut être illustrée avec l'utilisation d'une tâche de TRS, TRC et de Go/Nogo, qui ont été largement utilisées pour étudier les effets de l'exercice sur la cognition. Comme nous l'avons évoqué précédemment (cf chapitre 1, I, § 1.2, p 28), dans la tâche de TRS le sujet connaît à l'avance le stimulus présenté ainsi que la réponse à produire : il n'existe donc aucune incertitude évènementielle. Cette considération conduit à distinguer 3 étapes de traitement : une étape *sensorielle* qui est une étape d'encodage de la stimulation sensorielle en message nerveux, une étape *décisionnelle de* programmation de la réponse ainsi qu'une étape *d'exécution motrice* de la réponse (Luce 1986).

Lors de la tâche de Go/Nogo, il est demandé aux sujets de répondre lors de l'apparition d'un stimulus cible, et d'inhiber la réponse lors de l'apparition d'un autre stimulus considéré comme non pertinent. Cette tâche est associée à un contrôle cognitif de l'exécution de la réponse motrice (Aron 2007). Outre des étapes périphériques communes aux trois tâches présentées, il semblerait que dans ce type de tâche, le sujet doit aussi réaliser une étape perceptive *d'identification du stimulus,* qui correspond à une analyse du stimulus en termes de recherche d'indices ou de caractéristiques pertinents.

Enfin, lors d'une tâche de TRC, le sujet est soumis à la possibilité d'occurrence de plusieurs stimuli, et par conséquent plusieurs réponses sont considérées comme possibles. Dans ce cas de figure, outre les étapes périphériques de *détection* et d'*exécution motrice*, une étape perceptive (ou *d'identification du stimulus*), une étape de traduction perceptivo-motrice (ou de *sélection de la réponse*) et une étape de *programmation de la réponse motrice* doivent être réalisées par le système nerveux central (Theios, 1975) (Figure 11).

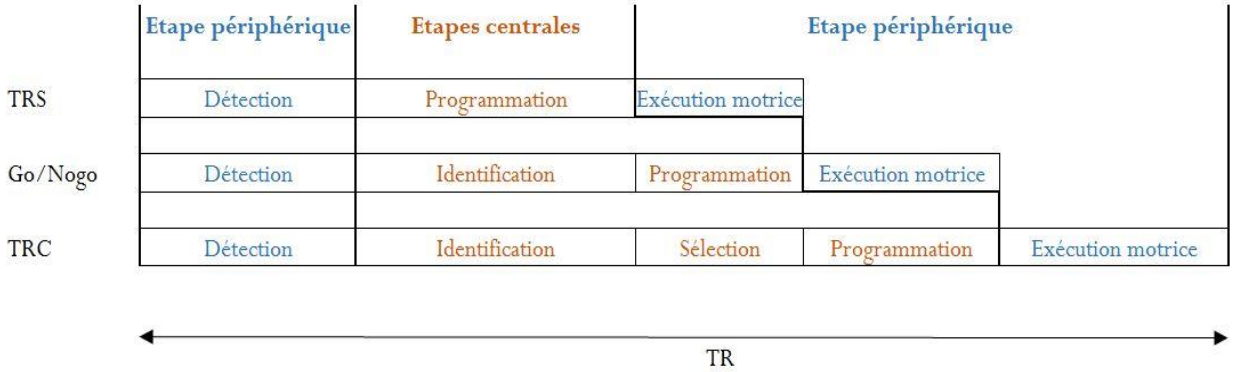

FIGURE 11 – **Processus mentaux impliqués dans une tâche de TRS, de Go/Nogo et de TRC.** Dans le cas d'une transmission discrète de l'information, le TR est égal à la somme des durées de chacune des étapes impliquées dans le traitement de l'information.

3.2. Amélioration des processus sensoriels

Plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées afin d'évaluer l'impact de l'exercice aigu sur le traitement de l'information et de localiser la/les étape(s) impactée(s).

L'une de ces méthodes, particulièrement facile d'utilisation, consiste à mesurer l'effet de l'exercice aigu sur l'indice de sensibilité sensoriel M_{tot} mesurée avec la FCF. Comme nous l'avons évoqué précédemment (cf chapitre 1, II, § 2.1, p 42), cette méthode, permet d'estimer si la sensibilité sensorielle (i.e., la capacité de discrimination) du sujet est modifiée à l'exercice et par conséquent si l'étape sensorielle de détection est affectée.

Dans l'une des études ayant manipulé la FCF, Davranche et Audiffren (2004) ont évalué l'effet d'un exercice de pédalage réalisé sur ergocyle à 20% et 50% de PMA, sur le critère de sensibilité sensorielle M_{tot}. Les résultats de cette étude indiquent que cet indice est significativement plus haut à l'exercice qu'au repos, et que cette valeur s'accroît aussi avec l'augmentation de l'intensité d'exercice (repos = 33.8 Hz ; 20%

PMA = 34.0 Hz ; 50% PMA = 34.5 Hz). L'interprétation classique de ce résultat est une amélioration de la sensibilité sensorielle et une augmentation du niveau d'éveil, ce qui est d'ailleurs conforme à plusieurs protocoles expérimentaux ayant investigué l'effet de l'exercice sur le seuil de fréquence critique de fusion (Davranche et al. 2005; Davranche et Pichon 2005; Lambourne, Audiffren, et Tomporowski 2010; Presland, Dowson, et Cairns 2005). Dans le cadre de cette logique, il a été suggéré que l'exercice affecte l'étape sensorielle de *détection du signal*.

Une autre méthode, appelée la Méthode des Facteurs Additifs (MFA), a été utilisée dans de nombreux protocoles expérimentaux en raison de son habilité à étudier la structure fonctionnelle du traitement de l'information. Proposée par Sternberg (1969), cette méthode est basée sur l'analyse des patrons d'interaction entre différents facteurs expérimentaux. La logique de la MFA suggère que si deux facteurs ont des effets additifs, la conclusion la plus probable est qu'ils affectent des étapes de traitement distinctes. Au contraire, si deux facteurs interagissent, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'ils affectent au moins une étape commune. L'application de cette méthode est basée sur la manipulation de plusieurs facteurs expérimentaux connus pour affecter des étapes de traitement distinctes (Sanders 1983). Parmi ces facteurs, il est classiquement admis que *l'intensité du stimulus* affecte la durée de l'étape sensorielle de *détection du stimulus* (Sanders 1990) tandis que la *qualité du signal* influence l'étape perceptive d'extraction des caractéristiques du stimulus (*identification du stimulus*) (Sanders 1998). Par ailleurs, la manipulation de la *compatibilité stimulus-réponse* affecte la durée de l'étape de traduction perceptivo-motrice (*sélection de la réponse*) (Sanders 1990) tandis que *l'incertitude*

temporelle ou la *complexité du répertoire de réponse* sont connues pour influencer les *étapes motrices* (Hasbroucq et al. 1995).

Plusieurs études ont tenté de localiser les effets de l'exercice sur la chaîne de traitement de l'information, en manipulant différents facteurs computationnels selon le modèle de la MFA (Arcelin, Delignieres, et Brisswalter 1998; Davranche et Audiffren 2004; Davranche et al. 2005, 2006; Audiffren, Tomporowski, et Zagrodnik 2008). Plusieurs d'entre elles indiquent un effet d'interaction entre l'exercice et l'intensité du signal (Davranche et al. 2005, 2006; Audiffren, Tomporowski, et Zagrodnik 2008). En revanche, aucun effet d'interaction significatif entre l'exercice et la qualité du signal ou la compatibilité stimulus-réponse n'a été observé (Arcelin, Delignieres, et Brisswalter 1998; Davranche et Audiffren 2004). Dans ce contexte, il a été suggéré que l'exercice affecte principalement *l'étape sensorielle de détection* du signal.

3.3. Amélioration des processus tardifs moteurs

Toujours dans le cadre de la MFA, Arcelin, Delignieres, et Brisswalter (1998) ont manipulé l'incertitude temporelle lors d'une tâche de TRC simultanément à un exercice de pédalage sur ergocycle à 60% PMA. Les résultats indiquent la présence d'un effet d'interaction sous-additif entre l'exercice et l'incertitude temporelle. Néanmoins celui-ci apparaît comme fragile, puisque le seuil de significativité est atteint seulement pour le troisième quartile de la distribution du TR. Les auteurs suggèrent que l'exercice pourrait affecter l'étape *d'exécution motrice*, mais que cet effet n'influencerait que la fin de la distribution des TR (i.e., les TR les plus longs).

Dans le but d'affiner cette localisation de l'effet de l'exercice sur la chaîne de traitement de l'information, d'autres méthodes notamment électrophysiologiques ont

été utilisées. La technique d'électromyographie (EMG) est l'une d'entre elles. L'EMG est une technique d'enregistrement de l'activité électrique produite par les muscles, réalisée au moyen d'électrodes disposées sur la peau des muscles sollicités dans la réalisation de la tâche cognitive. On considère que les enregistrements reflètent la sommation algébrique des potentiels élémentaires qui se propagent dans le muscle. Ils représentent donc le recrutement d'une partie des unités motrices du muscle. Plusieurs études ont utilisé cette technique dans le cadre d'une logique chronométrique. En effet, couplée à une tâche de TR, la technique d'EMG permet de décomposer le TR en deux composantes chronométriques, reflétant chacun des processus distincts : le « temps pré-moteur » (TPM) et le « temps moteur » (TM).

Le TPM correspond à l'intervalle de temps entre l'apparition du stimulus cible et le début de l'activité EMG du muscle impliqué dans la réponse motrice tandis que le TM correspond à l'intervalle de temps entre le début de l'activité EMG et le déclenchement de la réponse motrice (Botwinick et Thompson 1966). On considère donc que le TPM reflète la durée de l'ensemble des étapes en amont de l'exécution motrice, tandis que le TM reflète la durée des processus de transduction électromécaniques dans les fibres musculaires. L'analyse de ces deux composantes permet de déterminer si l'effet de l'exercice aigu sur le traitement de l'information s'effectue en amont ou en aval de l'activité EMG i.e., s'il affecte les processus d'intégration corticaux précoces ou les processus moteurs qui interviennent à la fin de la chaîne de traitement (Hasbroucq et al. 2001) (Figure 12).

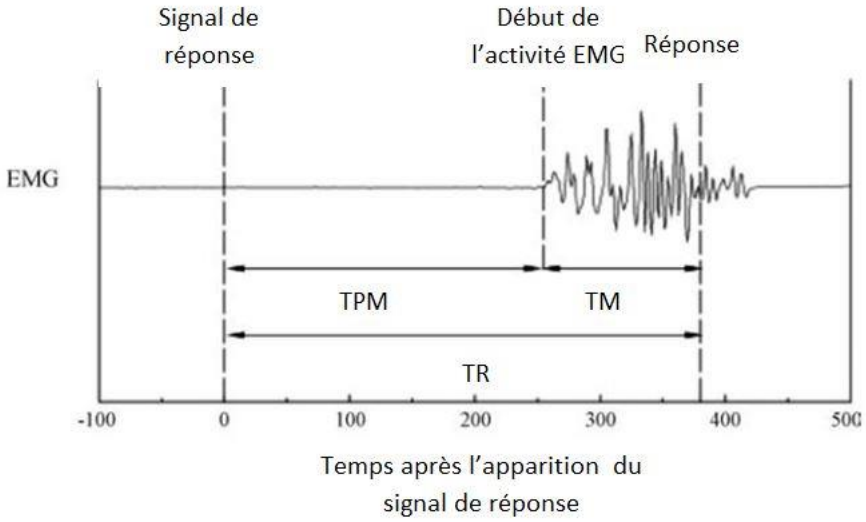

FIGURE 12 – **Activité électromyographique d'un muscle agoniste impliqué dans la tâche de TR en réponse à l'apparition d'un signal.** (D'après Davranche et Audiffren 2009).

Plusieurs études ont utilisé cette technique EMG afin de localiser l'effet de l'exercice lors de tâches de TRS et TRC (Audiffren, Tomporowski, et Zagrodnik 2008; Davranche et al. 2005, 2006; Beyer et al. 2017). A l'unanimité, les résultats suggèrent que l'exercice améliore bien les processus moteurs tardifs, et notamment les composants neuromusculaires de ces étapes. Si l'augmentation de la température lors de l'exercice est connue pour augmenter la vélocité des fibres musculaires et des nerfs périphériques (Audiffren, Tomporowski, et Zagrodnik 2008), il semblerait néanmoins que cet effet facilitateur sur le TM soit principalement médié par une augmentation de l'efficacité du recrutement des motoneurones qui traduit une amélioration de la commande cortico-motrice (Davranche et al. 2005, 2006).

L'analyse de la littérature ayant investigué l'effet de l'exercice sur l'excitabilité du cortex moteur par utilisation de la technique de Stimulation Magnétique Transcrânienne (« Transcranial Magnetic Stimulation », TMS), indique que cette augmentation de l'excitabilité corticale serait potentiellement liée par une diminution

de l'inhibition intracorticale, indiquée sur l'électromyogramme par une réduction de la période de silence corticale (Davranche et al. 2015). Les modifications neurochimiques induites par l'exercice notamment l'augmentation de la libération de DA et NA fourniraient une explication potentielle à cette augmentation de l'excitabilité du cortex moteur (Singh et Staines 2015).

EN RESUME

La chaîne de traitement de l'information sensorimotrice peut être décomposée en différentes étapes. Si la distinction entre les étapes *périphériques* et *centrales* est indépendante de la tâche réalisée par le sujet, en revanche le nombre d'étapes *centrales* dépend de l'incertitude événementielle de la tâche.

Au cours des dernières années, les différentes approches intégrant les méthodes de la psychologie expérimentale et des neurosciences indiquent que l'exercice affecte principalement les deux extrémités de la chaîne de traitement de l'information. Les résultats expérimentaux suggèrent que les processus d'intégrations corticaux précoces et notamment l'étape de *détection du signal* pourraient être affectés. D'autre part, les processus moteurs plus tardifs, et notamment l'étape *d'exécution de la réponse* seraient facilités, notamment en raison d'une augmentation d'excitabilité du cortex moteur.

L'ensemble des résultats expérimentaux est cohérent avec l'hypothèse d'une augmentation du niveau d'éveil lors de l'exercice aigu, médiée par les catécholamines. En effet, l'augmentation de l'activité noradrénergique, connue pour être impliquée dans la détection des signaux sensoriels et dans le maintien des processus de discrimination efficients à des hauts niveaux d'éveil (Robbins 1997), pourrait expliquer l'amélioration des étapes précoces de la chaîne du traitement de l'information. Le système dopaminergique impliqué dans les processus d'organisation, de planification motrice et de contrôle des mouvements, pourrait quant à lui être engagé dans l'amélioration des processus moteurs plus tardifs.

CHAPITRE 2

Exercice aigu, Nutrition et Fonctionnement cérébral

De nombreuses études suggèrent que la nutrition améliore la performance sportive en limitant les effets délétères liés à l'apparition de phénomène de fatigue lors d'efforts de longue durée (i.e., supérieure à 2 heures), et d'intensité modérée (entre 60 et 75% de la $\dot{V}O_{2max}$) (pour revues voir Burke, Millet, et Tarnopolsky 2007; Vandenbogaerde et Hopkins 2011). Les effets des stratégies nutritionnelles sur la performance ont principalement été étudiés pour ce type d'exercice, au cours duquel la déplétion glycogénique et l'apparition de phénomènes centraux de fatigue sont les principales causes d'altération de la performance (Meeusen et al. 2006). A ce titre, il existe aujourd'hui un consensus sur le bénéfice de l'ingestion d'hydrates de carbone (CHO) sous diverses formes (gel, solide ou liquide) et de différents types (glucose, maltodextrine et fructose), sur la capacité à retarder l'apparition des phénomènes de fatigue musculaire (Jeukendrup 2008). D'autre part, des travaux récents ont montré l'intérêt de stratégies nutritionnelles, telles que l'ingestion d'acides aminés branchés,

de tyrosine ou de caféine pour lutter contre la fatigue centrale (pour revue voir Meeusen 2014).

Néanmoins ces dernières années, l'idée selon laquelle la mise en œuvre de stratégies nutritionnelles pourrait aussi influencer la performance lors d'exercice de haute intensité (> 75% $\dot{V}O_{2max}$) et de durées inférieures à 1 heure s'est progressivement développée. Si plusieurs types de stratégies nutritionnelles sont envisagés dans ces travaux, trois d'entre elles sont largement utilisées par les athlètes tout en respectant les valeurs et éthiques sportives.

I – Hydrates de carbone

L'une des premières publications suggérant que l'ingestion de CHO a le potentiel d'améliorer la performance physique lors d'un effort relativement court, est parue en 1997 (Jeukendrup et al. 1997). Au cours de cette étude, les auteurs comparent l'effet de l'ingestion d'une solution de CHO (concentration : 7,6% ; type de CHO non précisé) enrichie en électrolytes (69 mg sodium, 18 mg potassium) et d'un placebo (Pl) sur la performance lors d'une course sur ergocycle de 40 kilomètres (km) réalisée le plus vite possible (course contre la montre, TT). Ils observent une amélioration significative de la performance de 2,3% dans la condition CHO comparée au Pl. Les auteurs avancent l'hypothèse que les effets bénéfiques indiqués pour cet exercice de haute intensité et d'une durée d'environ 1 heure, ne proviennent pas d'une élévation de la concentration sanguine en glucose, ni d'une augmentation de son taux d'oxydation en raison d'une durée d'exercice trop courte. Selon eux, les causes de cet effet ergogénique restent donc à définir.

Par la suite, le même groupe a évalué l'effet d'une perfusion d'une solution de glucose à 20% ou d'un Pl, sur la performance d'une course contre la montre sur ergocycle (Carter et al. 2004a). Les sujets devaient réaliser une quantité de travail (Watt, (W)) égale à 75% PMA (W = 0,75 x PMA x 3600 kilojoule (kJ)) le plus rapidement possible. Les résultats indiquent que la perfusion en glucose n'a aucun effet sur la performance, et cela malgré l'augmentation de sa disponibilité plasmatique pour l'oxydation et sa capture par les différents tissus (foie et tissu musculaire). Les auteurs suggèrent alors que l'effet ergogénique préalablement démontré (Jeukendrup et al. 1997) serait d'origine centrale et non métabolique.

Afin de valider cette hypothèse, la même équipe décide d'évaluer l'effet du rinçage de bouche d'une solution de maltodextrine à 6,4% de concentration, sur la performance d'une course contre la montre sur ergocycle (Carter, Jeukendrup, et Jones 2004b). Le rinçage de bouche consiste à absorber une dose d'environ 25 millilitres (ml) dans la cavité buccale, avant de réaliser un bain de bouche et de recracher l'intégralité du volume administré. L'absence d'ingestion implique qu'aucune action métabolique induite par la solution exogène ne peut se produire. Dans ce protocole expérimental, 8 rinçages de bouche de 25 ml et d'une durée de 5 secondes étaient réalisés tous les 1/8ème de course, soit environ 7 minutes. Les résultats indiquent que les rinçages de bouche, induisent une amélioration de la performance de course de 2,9% comparé au Pl. Ces résultats, qui sont similaires à ceux obtenus par Jeukendrup et al. (1997), confirment ainsi l'hypothèse d'un mécanisme central.

La recherche scientifique s'est aussi tournée vers cette nouvelle forme d'administration des CHO en raison de la possibilité de palier aux effets secondaires

lors de l'ingestion de fortes doses de CHO. En effet, il est rapporté chez près de 40 à 70% des athlètes d'endurance, et notamment lors d'exercices prolongés réalisés en condition chaude, l'apparition de désordres gastro-intestinaux qui peuvent impacter négativement la performance (Jeukendrup 2008). De plus, dans les disciplines sportives où les sujets sont soumis à un contrôle des apports énergétiques tels que les disciplines artistiques ou à catégorie de poids, ainsi que dans le cas de périodisation de l'apport glucidique pour optimiser l'entraînement, l'utilisation des CHO en rinçage de bouche semble particulièrement pertinente.

1.1. Effets centraux des hydrates de carbone sur la performance

Effet sur la performance physique

De nombreuses études se sont intéressées aux effets des CHO en rinçage de bouche sur la performance physique. Dans la logique du premier chapitre, seules les études sur les exercices d'endurance, qui sont les plus nombreuses et dont les résultats sont les plus significatifs sont présentées. Il est à noter que l'effet des CHO en rinçage de bouche a aussi été étudié sur la force maximale ou la répétition d'efforts maximaux, mais les résultats sont inconsistants indiquant parfois un effet bénéfique (e.g., Beaven et al. 2013; Gant, Stinear, et Byblow 2010; Phillips et al. 2014) ou une absence d'effet (e.g., Chong, Guelfi, et Fournier 2011; Dorling et Earnest 2013) (pour revue voir de Oliveira et al. 2017).

A la suite d'une analyse de la littérature scientifique disponible avec les mots clés suivants : « *carbohydrate », « mouth rinse », « exercise »*, nous avons recensé 24 études sur ce sujet, dont les valeurs de performance étaient disponibles sous la forme

de moyenne ± écart type ou moyenne ± erreur standard à la moyenne. Au total 38 tailles d'effet (TE) ont été calculées à partir des 25 études analysées (Table 1). L'efficacité du rinçage de bouche sur la performance d'endurance est présentée d'une part par la taille de l'effet, ainsi que par le pourcentage de changement comparé au Pl. Les tailles d'effet ont été calculées selon la méthode de Cohen (1992). Pour un d de Cohen égal à ± 0,2, l'effet est considéré comme faible, ± 0,5 comme modéré et enfin ± 0,8 comme large.

TABLE 1 – Résumé chronologique des études ayant investigué l'effet des CHO en rinçage de bouche sur la performance d'endurance.

Référence	Type d'exercice	Modalité d'exercice	Durée ex. (min)	Echantillon	Jeûne (h)	Conditions (% concentration)	Durée RB (s)	Fréquence des RB	Résultats (moyenne ± écart type)	Amélioration de la performance	Taille d'effet (d)
Carter et al. (2004b)	TT (914 kJ)	ergocycle	60	9	4	MALT (6,4%) vs eau	5	ts les 12,5%	Temps (min) 60,0 ± 1,5 vs 61,4 ± 1,56	S, +2,3%	0,91
Whitham et McKinney (2007)	TT	course	45	7	4	MALT (6,4%) vs Pl	5	avant départ + ts les 5,6%	Distance (m) 9333 ± 988 vs 9309 ± 993	ns, +0,26%	0,020
Rollo et al. (2008)	TT	course	30	10	14-15	CHO (6%) vs Pl	5	avant départ + ts les 17%	Distance (m) 6584 ± 520 vs 6469 ± 515	S, +1,8%	0,22
Chambers et al. (2009)	TT (914 kJ)	ergocycle	60	8	6	GLU (6,4%) vs Pl	10	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 60,4 ± 3,7 vs 61,6 ± 4,9	S, +1,9%	0,28
	TT (914 kJ)	ergocycle	60	8	6	MALT (6,4%) vs Pl	10	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 62,6 ± 4,7 vs 64,6 ± 4,9	S, +3,1%	0,42
Beelen et al. (2009)	TT (1053 kJ)	ergocycle	60	14	2	MALT (6,4%) vs eau	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 68,1 ± 4 vs 67,5 ± 3,7	ns -0,9%	-0,16
Pottier et al. (2010)	TT (975 kJ)	ergocycle	60	12	3	CHO-E (6%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5 %	Temps (min) 61,7 ± 5,1 vs 64,1 ± 6,5	S, +3,7%	0,41
Rollo et al. (2010)	TT	course	60	10	13-15	CHO-E (6,4%) vs Pl	5	avant départ + ts les 25 %	Distance (m) 14298 ± 685 vs 14086 ± 732	S, +1,5%	0,30
Rollo et al. (2011)	TT	course	60	10	14-15	CHO (6,4%) vs Pl	5	avant départ + ts les 25%	Distance (m) 14283 ± 758 vs 14190 ± 800	ns, +0,70%	0,12

Référence	Type d'exercice	Modalité d'exercice	Durée ex. (min)	Echantillon	Jeûne (h)	Conditions (% concentration)	Durée RB (s)	Fréquence des RB	Résultats (moyenne ± écart type)	Amélioration de la performance	Taille d'effet (d)
Fares et Kayser (2011)	ex.60% PMA jusqu'à épuisement	ergocycle	55	13	14	MALT (6,4%) vs eau	5-10	~ 9%	Temps (min) 53,9 ± 12,8 vs 48,3 ± 15,3	S, +12%	0,40
	ex. 60% PMA jusqu'à épuisement	ergocycle	55	13	3	MALT (6,4%) vs eau	5-10	~ 9%	Temps (min) 56,6 ± 12,2 vs 54,7 ± 11, 3	S, +3,5%	0,16
Lane et al. (2013)	TT	ergocycle	60	12	9- 10	MALT (10%) vs Pl	10	avant départ + ts les 12,5%	Puissance (W) 282 ± 6 vs 273 ± 6	S, +3,3%	1,5
	TT	ergocycle	60	12	2	MALT (10%) vs Pl	10	avant départ + ts les 12,5%	Puissance (W) 286 ± 6 vs 281 ± 5	S, +1,8%	0,23
Wright et Davison (2013)	TT	course	90	7	6	CHO (6%) vs Pl	5	0, 15, 30, 45 min	Distance (m) 14600 ± 1700 vs 13900 ± 1700	S, +5,0%	0,41
	TT	course	90	7	6	CHO (12%) vs Pl	5	0, 15, 30, 45 min	Distance (m) 14900 ± 1600 vs 13900 ± 1700	S, +7,2%	0,61
Sinclair et al. (2014)	TT	ergocycle	30	11	4	MALT (6,4%) vs eau	5	~ 20%	Puissance (W) 153 ± 17,4 vs 146 ± 13,6	S, +4,5%	0,46
	TT	ergocycle	30	11	4	MALT (6,4%) vs eau	10	~ 20%	Puissance (W) 156 ± 17,1 vs 146 ± 13,6	S, +6,8%	0,66
Sinclair & Bottoms (2014)	TT	pédalage bras	30	12	4	CHO (6,4%) vs Pl	5	~ 20%	Distance (m) 15300 ± 3300 vs 13150 ± 3360	S, +16%	0,65
Bottoms et al. (2014)	TT	ergocycle	30	12	4	MALT (6,4%) vs Pl	5	~ 17%	Distance (m) 15900 ± 2900 vs 14900 ± 2600	S, + 6,7%	0,44
Watson et al. (2014)	TT	ergocycle	60	10	12	CHO (6,4%) vs Pl	10	avant départ + ts les 10%	Puissance (W) 763 ± 141 vs 759 ± 149	ns, +0,50 %	0,030

Référence	Type d'exercice	Modalité d'exercice	Durée ex. (min)	Echantillon	Jeûne (h)	Conditions (% concentration)	Durée RB (s)	Fréquence des RB	Résultats (moyenne ± écart type)	Amélioration de la performance	Taille d'effet (d)
Che Muhamed et al. (2014)	TT 10 km	ergocycle	12	9	13,5	CHO (6%) vs Pl	5	avant départ	Temps (min) 12,9 ± 1,70 vs 12,6 ± 1,70	ns, -2,4%	-0,18
	TT 10 km	ergocycle	12	9	13,5	CHO (6%) vs pas RB	5	avant départ	Temps (min) 12,9 ± 1,70 vs 16,8 ± 1,60	S, +23%	2,4
Cramer et al. (2015)	TT 40 km	ergocycle	60	8	3	MALT (6,5%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 63,9 ± 3,20 vs 64,3 ± 2,80	ns, +0,60 %	0,13
Clarke et al. (2015)	TT 5 km	course	27	15	5	MALT (3%) vs Pl	10	avant départ + ts les 20%	Temps (min) 27,1 ± 4, 33 vs 26,2 ± 4,07	ns, -3,5%	-0,20
	TT 5 km	course	27	15	5	MALT (6%) vs Pl	10	avant départ + ts les 20%	Temps (min) 27,1 ± 3,52 vs 26,2 ± 4,07	ns, -3,1%	-0,19
	TT 5 km	course	27	15	5	MALT (12%) vs Pl	10	avant départ + ts les 20%	Temps (min) 26,5 ± 4, 31 vs 26,2 ± 4,07	ns, -0,90%	-0,030
Bastos-Silva et al. (2016)	ex. 110% PMA jusqu'à épuisement	ergocycle	2,5	13	2	MALT (6,4%) vs Pl	10	avant départ	Temps (s) 178 ± 42,2 vs 163 ± 26,7	ns, +8,8 %	0,40
	ex. modéré jusqu'à épuisement	ergocycle	71	13	2	MALT (6,4%) vs Pl	10	avant départ puis ~ 20%	Temps (min) 76,6 ± 19,7 vs 65,4 ± 15,2	S, +17%	0,64
Ispoglou et al. (2015)	TT	ergocycle	60	7	3	CHO (4%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 62,8 ± 4,00 vs 62 ± 3,00	ns, -1,3%	-0,23
	TT	ergocycle	60	7	3	CHO (6%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 63,4 ± 3,40 vs 62,0 ± 3, 00	ns, -2,3%	-0,44
	TT	ergocycle	60	7	3	CHO (8%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 63,0 ± 4,00 vs 62,0 ± 3,00	ns, -1,6%	-0,28
Ali et al. (2016)	TT	ergocycle	68	9	12	CHO (15%) vs Pl	8	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 68,4 ± 3,90 vs 68,3 ± 5,20	ns, -0,15 %	-0,020

Référence	Type d'exercice	Modalité d'exercice	Durée ex. (min)	Echantillon	Jeûne (h)	Conditions (% concentration)	Durée RB (s)	Fréquence des RB	Résultats (moyenne ± écart type)	Amélioration de la performance	Taille d'effet (d)
Kulaksız et al. (2016)	TT 20 km	ergocycle	40	9	12	MALT (3%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 40,1 vs ± 3,9 vs 40,2 ± 4,0	ns, +0,25 %	0,030
	TT 20 km	ergocycle	40	9	12	MALT (6%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 40,1 vs ± 4,4 vs 40,2 ± 4,0	ns, +0,25 %	0,020
	TT 20 km	ergocycle	40	9	12	MALT (12%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 39,3 vs ± 4,2 vs 40,2 ± 4,0	ns, +2,2 %	0,22
James et al. (2017)	TT	ergocycle	60	11	12	MALT (7%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 57,3 ± 4,50 vs 59,5 ± 4,90	S, +3,7%	0,47
	TT	ergocycle	60	11	12	MALT (14%) vs Pl	5	avant départ + ts les 12,5%	Temps (min) 57,4 ± 4,10 vs 59,5 ± 4,90	S, +3,5%	0,46
Fraga et al. (2017)	ex. 85% $\dot{V}O_{2max}$ jusqu'à épuisement	course	38	6	12	GLU (8%) vs Pl	10	15 min avant départ puis ~ 40% et 80%	Distance (m) 9855 ± 4119 vs 7295 ± 3727	S, +35%	0,65
Bataineh et al. (2018)	Ex. incrémental jusqu'à épuisement	course	~21	18	13-14	SACH (7,5%) vs Pl	10	Avant départ	Temps (min) 21,3 ± 2 vs 20,9 ± 1,9	S, +1,9%	0,28

Note : TT = course contre la montre ; kJ = kilojoule ; km = kilomètre ; ex. = exercice ; PMA= puissance maximale aérobie ; $\dot{V}O_{2max}$ = débit maximal d'O_2 ; CHO = carbohydrate ; MALT = maltodextrine ; GLU = glucose ; SACH= saccharose ; Pl = placebo ; RB = rinçage de bouche ; W = watt ; min = minute ; s = secondes, S = $p<.05$; NS = $p> .05$. Une taille d'effet et un pourcentage d'amélioration de la performance positif indiquent une amélioration de la performance physique comparée au placebo, tandis que des valeurs négatives signifient une altération de la performance comparée au placebo.

L'analyse de l'ensemble de ces études indique une amélioration moyenne de la performance d'endurance de +4,2% (Figure 13A), avec un effet de faible magnitude (TE = 0,3) (Figure 13B).

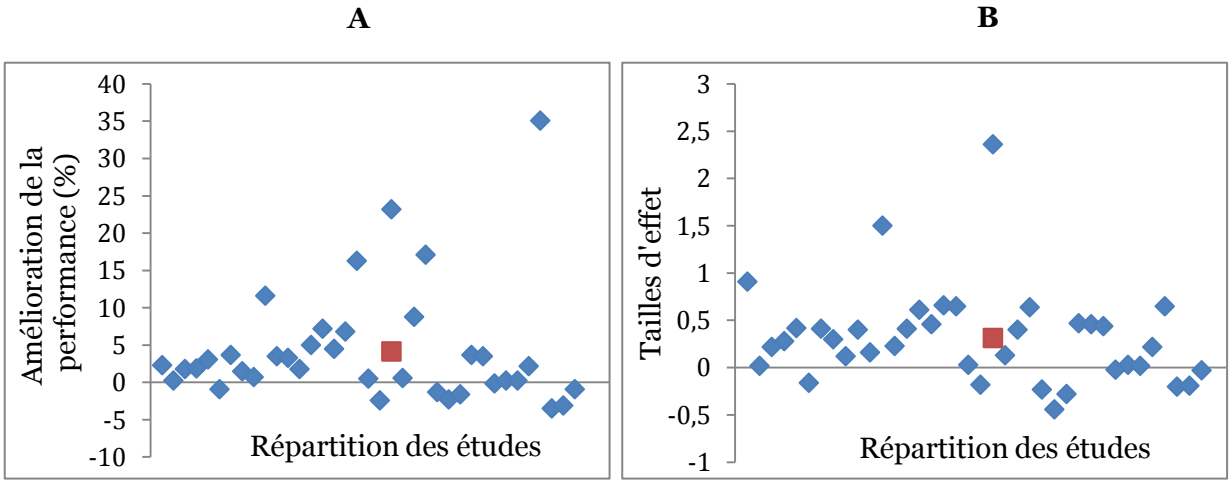

FIGURE 13 – (A) **Effets du rinçage de bouche avec des CHO sur l'amélioration de la performance physique** ; (B) **Tailles d'effet du rinçage de bouche avec CHO sur la performance physique**. L'ensemble des losanges bleus représente la répartition de ces variables pour chacune des études détaillées dans la table 1. Les deux carrés rouges représentent l'amélioration de la performance moyenne (A) et la moyenne de taille d'effet (B) pour les 39 données.

L'analyse de la littérature permet également de mettre en évidence des similitudes dans les protocoles expérimentaux : i) une durée de rinçage de bouche *courte (maximum 10 secondes)* avant rejet de l'intégralité de la solution (25 ml) ; ii) *une concentration* de solution de *6-8%*, conforme à celle classiquement utilisée lors de l'ingestion ; iii) des rinçages de bouche administrés de façon *répétée* tous les 1/8ème de temps d'exercice.

A notre connaissance, une seule l'étude a investigué l'effet de la durée du rinçage de bouche sur la performance (Sinclair et al. 2014). Les auteurs ont comparé à un Pl, les effets de deux rinçages de bouche de maltodextrine à 6,4% de concentration, respectivement d'une durée de 5 et 10 secondes lors d'une course contre la montre de 30 minutes réalisée sur ergocycle. Les résultats indiquent que

seul le rinçage de bouche de 10 secondes améliore significativement la distance réalisée comparée au Pl (CHO= 20,4 ± 2,3 km vs Pl = 10,2 ± 2,2 km, $p < 0.01$). Bien que 10 sujets sur 11 augmentent leur performance dans la condition 5 secondes comparée au Pl, cette différence n'atteint pas le seuil de significativité. De même 8 sujets sur 11 augmentent la distance réalisée lors du rinçage de 10 secondes comparé à la celui de 5 secondes, mais cette différence n'atteint pas le seuil de significativité.

L'effet ergogénique des CHO semble ne pas dépendre de la concentration de la solution, ni de l'intensité de perception du goût sucré. En effet, deux études ont comparé l'effet d'un rinçage de bouche avec une solution de maltodextrine (valeur calorique mais goût neutre) dosée à 6-7% à celui d'une solution similaire à 12-14% de concentration, sur la performance de course contre la montre respectivement de 60 et 90 minutes (James et al. 2017 ; Wright et Davison 2013). Les résultats indiquent que les deux solutions augmentent la distance parcourue comparée au Pl, mais sans différence significative entre les deux solutions. Par ailleurs, Hawkins et al. (2017) ont comparé les effets de plusieurs boissons avec ou sans apport énergétique et au goût sucré plus ou moins intense, sur la performance d'une course contre la montre. Les auteurs suggèrent un effet significatif du rinçage de bouche avec apport énergétique sur la performance, comparé à la solution contrôle. En revanche cet effet ergogénique n'est pas retrouvé avec les solutions sans valeur calorique et cela quelle que soit l'intensité du goût sucré. Il est donc suggéré que la perception du goût sucré n'ait aucune influence sur la performance.

L'effet bénéfique des CHO en rinçage de bouche semble en revanche, dépendre du statut nutritionnel du sujet. Lane et al. (2013) ont étudié l'effet de plusieurs

rinçages de bouche réalisés tous les 1/8ème de temps d'exercice, à la suite d'un jeûne prolongé (~ 12 heures) (condition « jeûne »), où après un repas riche en CHO (~ 2 heures, à raison de 2,5 $g.kg^{-1}$ par poids de corps de CHO) (condition « repas »). Les résultats indiquent un effet d'interaction entre les conditions de rinçage de bouche (CHO vs Pl) et le statut nutritionnel des sujets (jeûne vs repas) ($p = 0.015$). L'augmentation de la puissance moyenne produite dans la condition CHO comparé au Pl, est significativement plus importante en condition « jeûne » comparée à la condition « repas » (respectivement +3,6% vs +1,8%, $p < .01$). De façon identique Fares et Kayser (2011) indiquent une amélioration de la performance avec le rinçage de bouche en CHO dans une épreuve à 60% $\dot{V}O_{2max}$ menée jusqu'à épuisement, supérieure dans la condition de « jeûne » comparée à la condition « repas » (respectivement +7% vs +3%). Néanmoins, dans cette dernière étude, l'effet d'interaction entre le rinçage de bouche et le statut nutritionnel des sujets n'est que tendanciel ($p = 0.75$). L'efficacité du rinçage de bouche en situation de jeûne prolongé est aussi confirmée par une étude récente démontrant une amélioration significative de la performance de course ($p = .002$) de près de 2% après un unique rinçage de bouche de sucrose (à 7,6%) chez des athlètes en période de jeûne prolongé (Bataineh et al. 2018).

L'analyse de l'ensemble des études détaillées dans la Table 1 suggèrent que l'effet des CHO en rinçage de bouche est positif : de faible magnitude en condition postprandiale (jeûne ≤ 4 heures) (+4% d'amélioration de la performance, TE =0,25) et de magnitude modérée en condition préprandiale (jeûne ≥ 6 heures) (+5,2% d'amélioration de la performance, TE = 0,43) (Figure 14).

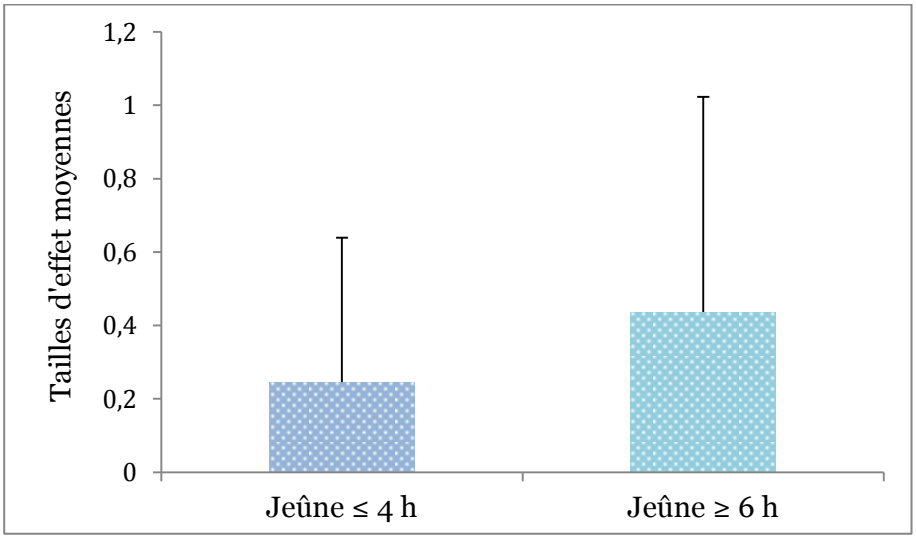

FIGURE 14 – **Tailles d'effet moyennes de l'utilisation des CHO en rinçage de bouche sur la performance d'endurance en fonction du statut nutritionnel du sujet**. (Données issues de la Table 1).

Enfin, l'utilisation d'aérosols nasals est la technique la plus récemment investiguée. Il a été proposé que celle-ci permette une réponse ergogénique extrêmement rapide et cela pour de faibles dosages (De Pauw et al. 2017a). Dans une étude récente, De Pauw et al. (2017b) ont investigué l'effet de plusieurs pulvérisations nasales de glucose (concentration de 80 $mg.ml^{-1}$) réalisées tous les 1/4ème de temps sur la performance d'une course contre la montre de 30 minutes, ainsi que sur la performance anaérobie lors d'un test de Wingate (30 secondes de sprint sur ergocycle) chez 11 sujets. Les résultats de cette étude ont été analysés par une approche qualitative (Hopkins et al. 2009) qui permet de déceler de plus faibles changements pouvant impacter la performance globale. Cette approche particulièrement utilisée dans la médecine sportive et les sciences de l'exercice, s'abroge du seuil de significativité et de l'hypothèse nulle, et se propose d'élaborer des inférences basées sur l'intervalle de confiance par rapport à la valeur seuil pour un

effet substantiel. Les résultats indiquent une amélioration *très probable*[2] de la performance de course (+2,4%) comparée au Pl, sans effet sur la performance de l'exercice anaérobie.

Effet sur la perception de l'effort

La mesure de la perception de l'effort (RPE) est considérée comme un marqueur de l'intensité des perturbations homéostatiques pendant l'exercice. Cet indice subjectif émane de l'interaction complexe de plusieurs processus perceptifs, cognitifs et métaboliques (Eston 2012). Dans la grande majorité des études, le RPE est mesuré à partir des échelles de Borg (Borg 1982) même si d'autres mesures sont parfois utilisées. L'analyse de la littérature nous a conduits à répertorier 12 études ayant investigué l'effet des CHO en rinçage de bouche sur le RPE. Trois types de résultats sont observés :

i) Aucune modification du RPE et de la performance physique (e.g., Beelen et al. 2009; Ali et al. 2016; Ispoglou et al. 2015; Clarke et al. 2017; Watson et al. 2014; Kulaksız, 2016) ;

ii) Une diminution du RPE associée à une amélioration de la performance physique (e.g., Fares et Kayser 2011) ;

iii) Aucune modification du RPE associée à une amélioration de la performance physique (e.g., Carter, Jeukendrup, et Jones 2004b; Chambers, Bridge, et Jones 2009; Pottier et al. 2010; Lane et al. 2013;

[2] Les résultats obtenus selon cette méthode statistique dite « qualitative » seront présentés en italique tout au long de ce manuscrit.

Wright et Davison 2013; Devenney, Collins, et Shortall 2016; Fraga et al. 2017; James et al. 2017).

Dans ce dernier cas, il est à noter que l'absence d'effet sur le RPE associé à une amélioration de la performance peut être considérée comme un effet positif. En effet, de nombreuses études montrent l'effet régulateur du RPE sur les stratégies d'allure (« pacing ») en compétition et sur la performance (Tucker 2009). Ainsi une diminution ou une stabilité de la perception de l'effort, permettrait au sujet de s'engager d'autant plus dans l'exercice physique et d'améliorer la performance.

Effet sur la performance cognitive

D'une façon générale, très peu d'études se sont intéressées aux effets des supplémentations nutritionnelles de différents types (caféine, carbohydrates, guarana) et sous différentes formes (ingestion, rinçage de bouche, spray nasal) sur la performance cognitive, pendant ou après un exercice physique. A notre connaissance aucune étude n'a investigué l'effet d'interaction entre la nutrition et l'exercice sur le traitement temporel.

L'équipe de Collardeau et al. (2001) a investigué l'effet de l'ingestion d'une solution de CHO (à 5,5% de concentration) sur la performance cognitive mesurée lors de tâches de TRS et de TRC, avant et après un exercice de course sous-maximal de 100 minutes réalisé sur tapis. Les sujets devaient ingérer au total 20 $ml.kg^{-1}$ de poids de corps de solution (~ 1372 ml) répartis avant le départ, puis toutes les 15 minutes de course. Les résultats suggèrent un effet d'interaction entre les conditions (CHO vs Pl) et l'exercice (pré vs post exercice) seulement pour la tâche de TRC. En effet, l'ingestion de CHO entraîne une diminution significative du TR après l'exercice

comparé à avant exercice (~ 5%), qui n'est pas retrouvée dans la condition Pl. Par ailleurs, aucun effet n'est relevé sur le taux d'erreurs, suggérant que cette amélioration ne provient pas d'un changement de stratégie du sujet. A noter que dans cette étude, aucune détérioration de la performance n'a été observée dans la condition Pl et cela même après 100 minutes d'exercice. L'effet bénéfique de l'exercice sur la performance cognitive semble donc relativement robuste à la durée de l'exercice.

Concernant le contrôle de l'interférence, à notre connaissance seules deux études issues du même groupe ont investigué l'effet de l'ingestion de CHO. Au cours de ces études, la tâche de Stroop (Stroop 1935) était réalisée après un exercice intermittent de haute intensité, de respectivement 30 et 60 minutes (Welsh et al. 2002; Winnick et al. 2005). Cette tâche de conflit permet d'une part d'évaluer l'efficacité du traitement de l'information en termes de vitesse et de précision, mais aussi d'évaluer le contrôle de l'interférence. La variable permettant de rendre compte de cet effet est l'effet d'interférence, calculé par la différence entre les essais incongruents (IN) et congruents (CO). Les résultats indiquent que l'ingestion de CHO n'a pas d'effet significatif sur l'effet d'interférence. Néanmoins dans l'une de ces études (Welsh et al. 2002), il est indiqué une diminution tendancielle de l'effet d'interférence avec la condition CHO, dès 30 minutes d'exercice (aucune valeur de p disponible dans l'étude), ce qui pourrait être interprété comme une amélioration du contrôle de l'interférence.

Concernant l'utilisation des CHO en rinçage de bouche, une étude récente (De Pauw et al. 2015) a investigué l'effet d'un unique rinçage de bouche de 20 secondes composé de maltodextrine (à 6,4% de concentration) ou d'un Pl, sur l'activation

cérébrale au repos mesurée par EEG, ainsi que sur la performance cognitive lors d'une tâche de Stroop. Bien que les résultats suggèrent une augmentation de l'activité du cortex orbitofrontal (COF) qui est considéré comme le cortex gustatif secondaire, dans la condition CHO comparée au Pl, aucun effet sur la P300 et sur la performance de la tâche de Stroop n'est indiqué. Ces résultats sont en accord avec l'une des rares études ayant investigué l'effet d'interaction entre l'utilisation des CHO en rinçage de bouche, l'exercice et la performance cognitive (Rowlatt et al. 2017). Au cours de protocole, Rowlatt et al. (2017) ont évalué l'effet de 6 rinçages de bouche de 25 secondes et composés de 25 ml de maltodextrine (à 6,7% de concentration) administrés au cours de l'exercice, sur la performance cognitive lors d'une tâche de Stroop. La tâche était réalisée avant et après une épreuve de 6 combats d'épée permettant de simuler le premier tour d'une compétition d'escrime. Aucun effet de la nutrition n'a été trouvé sur la vitesse et la précision du traitement de l'information pour les deux types d'essais (CO : $p = .58$; IN : $p = .68$). Par ailleurs, aucun effet d'interaction entre l'exercice, la condition et la congruence ((pré vs post) × (CHO vs Pl) × (CO vs IN)), qui indiquerait un effet sur l'interférence, n'a été observé.

A ce jour très peu d'études se sont intéressées à l'effet de l'utilisation des CHO en spray nasal sur la performance cognitive. L'équipe de De Pauw et collaborateurs en ont investigué l'effet respectivement au repos (De Pauw et al. 2017a) et après une course contre la montre sur ergocycle de 30 minutes (De Pauw et al. 2017b). Dans des conditions expérimentales de repos, l'effet d'une unique pulvérisation nasale de glucose (80 $mg.ml^{-1}$) d'une durée de 20 secondes, était mesuré sur l'activation cérébrale à travers l'utilisation de l'EEG et la mesure des potentiels évoqués cérébraux, ainsi que sur la performance cognitive lors d'une tâche de Stroop. Les

résultats indiquent que malgré une augmentation de l'activation de plusieurs zones cérébrales impliquées dans la réalisation de cette tâche cognitive et la résolution d'un conflit (COF, cortex sensorimoteur, cortex cingulaire, cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL)) comparé au Pl, aucun effet n'est observé sur la P300 et sur la performance cognitive (De Pauw et al. 2017a). Dans des conditions expérimentales similaires, il a aussi été observé que l'utilisation des CHO en spray nasal n'a aucun effet sur la performance cognitive mesurée après un sprint de 30 secondes et un exercice d'endurance de 30 minutes (De Pauw et al. 2017b). Ainsi, à ce jour, les résultats de l'utilisation des CHO en spray nasal sont peu concluants et nécessitent des recherches supplémentaires afin de statuer d'un hypothétique effet et du dosage requis.

1.2. Effets centraux des hydrates de carbone sur la performance : hypothèses explicatives

L'effet des CHO en ingestion ou rinçage de bouche sur la performance lors d'exercices inférieurs à 1 heure, implique un mécanisme central, vraisemblablement médié par des cellules réceptrices localisées dans la bouche, ainsi que dans les structures gastro-intestinales. Ces récepteurs gustatifs sont des protéines chimioréceptrices appelées « TRCs » ou « taste-receptor cells », qui répondent au type et à la quantité de substance chimique dissoute dans la salive. Ces cellules permettent chez l'humain la détection de cinq goût différents : le salé, l'acide, l'amer, l'umami et le sucré (Spector 2005), même si pour ce dernier de récentes études suggèrent que les cellules réceptrices seraient plus sensibles aux valeurs caloriques du stimuli qu'à sa saveur sucrée (Chambers, Bridge, et Jones 2009). La détection d'un stimulus aux propriétés chimiques et caloriques des hydrates de carbone se réalise par un groupe de cellules regroupées sous le nom de « T1Rs ». Cette première étape

de l'intégration du message sensoriel, appelée la *phase de détection* se réalise par un premier contact entre la substance chimique dissoute dans la salive (ligand) et le pore gustatif de la cellule réceptrice. Bien que ce couplage entre le ligand gustatif et la protéine membranaire diffère pour chaque saveur, cette interaction génère une variation de potentiel d'action dans la cellule réceptrice sensorielle appelée : la *phase de transduction*. De là, l'information gustative, détectée par les bourgeons du goût est relayée au cerveau via trois nerfs crâniens présentant des axones gustatifs primaires : le nerf facial, le nerf glossopharyngien et le nerf pneumogastrique. L'intégralité des axones du goût passe par le tronc cérébral (TC) où ils se regroupent et établissent une synapse dans le premier relais de la chaîne sensorielle gustative située au niveau ponto-bulbaire, le noyau du faisceau solitaire. A partir de ce relais pontique, les neurones du noyau gustatif convergent vers le thalamus ipsilatéral, avant de diverger vers plusieurs zones du néocortex. Les informations gustatives sont d'abord relayées au cortex primaire du goût, localisé dans l'opercule frontal et l'insula antérieure (OF/IA) avant de projeter vers le cortex gustatif secondaire, situé dans le COF (Simon et al. 2006; Small et al. 2007).

Les deux cortex gustatifs différent significativement par leurs fonctions. Il a été montré que les neurones du goût dans le COF sont modulés par la faim (Rolls, Sienkiewicz, et Yaxley 1989) alors qu'a contrario, les neurones du cortex gustatif primaire n'y répondent pas. Cela suggère que seule l'identité du goût, sans aucune valeur de récompense est représentée dans le cortex gustatif primaire (Rolls 2000). Cette structure a donc pour seule fonction de discriminer les saveurs entre elles et d'en déterminer l'intensité. Au contraire, il a été proposé que le cortex gustatif secondaire code pour les aspects hédoniques et motivationnels du stimulus sensoriel

(Rolls et al. 2010). Subséquemment les cortex gustatifs primaire et secondaire projettent vers différentes zones cérébrales telles que le cortex cingulaire antérieur (CCA), le striatum, l'hypothalamus, l'amygdale et le CPFDL qui semblent apporter un lien entre la voie gustative et les réponses émotionnelles, cognitives et comportementales attendues (Small et al. 2001; Simon et al. 2006; Rolls 2007) (Figure 15).

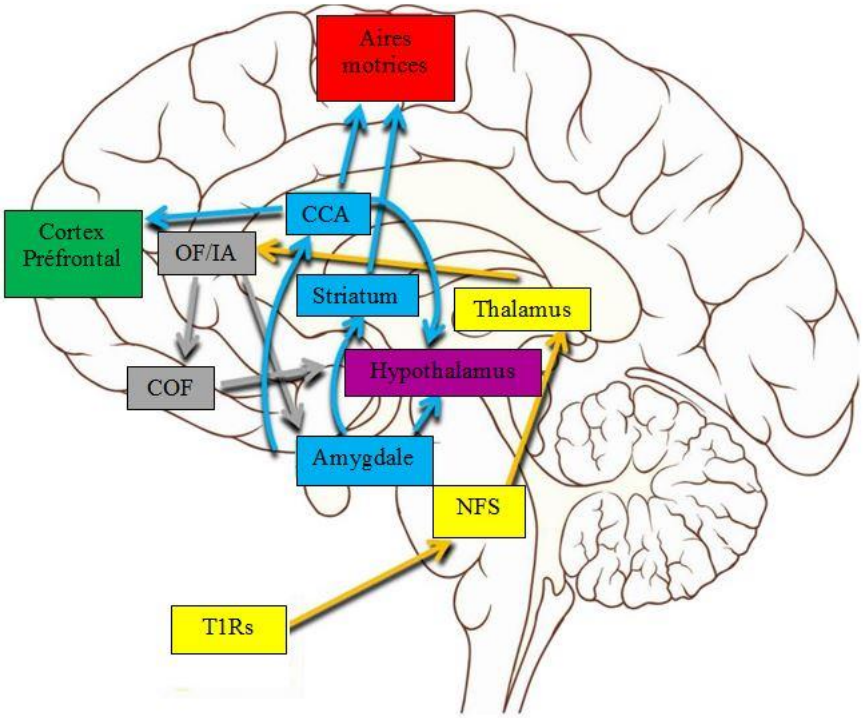

FIGURE 15 – **Représentation schématique des voies gustatives centrales.** Sont représentés : en jaune, les relais des signaux neuronaux ; en gris, les cortex gustatifs primaires et secondaires ; en bleu, les structures impliquées dans la réponse émotionnelle ; en violet, la structure impliquée dans la réponse autonome ; en vert, les structures de la perception consciente ; en rouge, les structures impliquées dans la réponse motrice. T1Rs = récepteurs aux hydrates de carbone ; NFS = noyau du faisceau solitaire ; OF/IA = opercule frontal/insula antérieure ; COF = cortex orbitofrontal ; CCA = cortex cingulaire antérieur (Issu de Gam 2014).

Chambers, Bridge, et Jones (2009) ont comparé l'effet d'une exposition orale en glucose (goût sucré et valeur calorique), saccharine (goût sucré mais aucune valeur

calorique) ainsi qu'en maltodextrine (goût neutre et valeur calorique) sur l'activation cérébrale au repos. Les résultats issus de l'utilisation de l'image à résonnance magnétique fonctionnelle (IRMf) indiquent un pattern d'activation similaire entre les solutions de glucose et de maltodextrine. Les zones principalement activées sont les cortex gustatifs primaire et secondaire, le striatum, le CCA ainsi que le DLPFC qui possède un rôle dans la préparation et la sélection de la réponse cognitive. En revanche, ce pattern d'activation n'est pas retrouvé lors de l'exposition à la solution de saccharine, ce qui pourrait expliquer l'absence d'effet ergogénique indiqué dans l'étude de Hawkins et al. (2017). Il a donc été proposé que l'activation des zones cérébrales ne soit pas due au goût sucré, mais plutôt aux propriétés caloriques du stimulus considérées comme une valeur de récompense pour l'ensemble du système (Chambers, Bridge, et Jones 2009). Ainsi, la conclusion de cette étude suggère la présence de récepteurs buccaux qui répondraient aux CHO en fonction de leur valeur calorique, indépendamment de leur goût. Il semble important de préciser que dans cette étude, d'une part les concentrations en glucose et maltodextrine sont de 18%, soit presque trois fois plus concentrées que les concentrations classiquement utilisées à l'ingestion, et d'autre part les sujets étaient en état de jeûne depuis 6 heures, ce qui peut amplifier la magnitude des résultats obtenus.

L'un des effets bénéfiques possible du rinçage de bouche est une augmentation de l'excitabilité de la voie cortico-motrice. Cette hypothèse a été vérifiée au cours d'un des rares protocoles ayant utilisé la TMS (Gant, Stinear, et Byblow 2010). Cette technique non invasive, permet d'évaluer l'efficacité et l'intégrité des neurones de la voie entre le cortex moteur et les effecteurs musculaires. Quand une stimulation est réalisée au-dessus du cortex moteur, une réponse rapide appelée « potentiel

évoqué moteur», peut être mesurée à la périphérie au niveau musculaire par un électromyogramme. Ces auteurs ont montré une augmentation de l'amplitude des potentiels évoqués moteurs lors de la présence de CHO dans la cavité buccale, de 30% sur des muscles ayant subi un protocole préalable de fatigue et de 9% sur des muscles non fatigués. Aucun effet n'a été montré sur la période de silence ce qui suggère que les effets facilitateurs sur les potentiels évoqués moteurs indiqués précédemment ne sont pas induits par une diminution de l'inhibition du cortex moteur.

La même équipe a décidé de localiser, à l'aide de l'IRMf, les zones cérébrales activées lors de la réalisation d'une tâche motrice de préhension manuelle d'un dynamomètre, en présence de CHO ou d'un Pl dans la cavité buccale (Turner et al. 2014). Les résultats indiquent que l'activation des zones cérébrales lors de la tâche motrice, principalement le cortex sensorimoteur controlatéral et le cervelet ipsilatéral est plus importante dans la condition CHO qu'avec la solution contrôle, ce qui pourrait expliquer l'amélioration de la performance dans différents types d'exercices (cf Table 1). De plus, il est suggéré que certaines zones cérébrales du cortex occipital, impliquées dans la reconnaissance des signaux visuels, soient aussi préférentiellement activées lors de la présence de CHO dans la cavité buccale. Ce pattern d'activation pourrait permettre une amélioration des étapes de détection précoce de la chaîne de traitement de l'information. Néanmoins plus d'études sont nécessaires pour valider cette hypothèse.

Enfin, concernant les mécanismes d'action des aérosols, il semblerait que la présence de récepteurs extra-oraux, similaires à ceux rencontrés dans la cavité orale puissent être impliqués dans les effets observés (De Pauw et al. 2017a). Il n'est pas non plus exclu que la forte perméabilité de l'épithélium nasal permettre le passage de

petite molécule telle que le glucose dans le flux sanguin. Néanmoins nous n'avons pas d'information réelle sur le délai de ce mécanisme d'action.

EN RESUME

Il semblerait que l'effet bénéfique des CHO sur les exercices d'endurance inférieurs à 1 heure soit principalement médié par une action centrale, qui implique la détection de la valeur calorique de la solution par des cellules réceptrices situées dans la cavité buccale.

Cette intégration du message sensoriel entraînerait l'augmentation de l'activation de plusieurs zones cérébrales telles que le DLPFC, l'amygdale, le striatum, le CCA et l'hypothalamus, connues pour apporter un lien entre la voie gustative et les réponses émotionnelles, cognitives et comportementales attendues. Il en découle une diminution de la perception de l'effort au cours de l'exercice ainsi qu'une augmentation de l'excitabilité cortico-motrice, qui à ce jour, sont les principales hypothèses avancées pour expliquer l'effet ergogénique sur la performance physique.

L'effet observé sur la performance physique qui est de magnitude faible (~4% d'amélioration, TE = 0,3), varie en fonction du statut nutritionnel du sujet. Il est plus important dans des conditions « préprandiale » (TE =0,42) que dans une condition « postprandiale» (TE = 0,25). Même si il a été proposé que la durée du rinçage de bouche puisse moduler la magnitude d'effet, à ce jour plus d'études sont nécessaires afin de valider ce lien.

A ce jour trop peu d'études ont été réalisées pour pouvoir conclure sur l'effet des CHO en rinçage de bouche sur la performance cognitive, pendant ou dès la fin de l'exercice.

II- Caféine

2.1. Effets de la caféine sur la performance

Effet sur la performance physique

L'effet de l'ingestion de caféine sur la performance physique a été investigué dans de nombreuses études ces 50 dernières années. L'analyse globale de la littérature suggère que l'ingestion de caféine améliore la performance physique d'environ 12%, avec un effet de taille modérée (TE = 0,41) (pour revue voir Doherty et Smith 2004). Néanmoins, cet effet est dépendant du type d'exercice physique ainsi que de l'état physique et de fatigue du sujet (McLellan et al. 2003-2004). Une amélioration de la performance d'environ 5% et de magnitude faible est décrite pour les exercices intenses de courtes durées (TE = 0,16) ainsi pour les exercices incrémentaux continus menant à un épuisement rapide (≤ 20 minutes) (TE = 0,17). Similairement aux CHO, l'effet de la caféine en ingestion semble être plus important pour les exercices d'endurance, avec une amélioration de la performance de forte magnitude (+21%, TE = 0,63) (Doherty et Smith 2004) (Figure 16). Il a aussi été proposé que l'ingestion de caféine soit bénéfique chez les consommateurs réguliers comme chez les non consommateurs. Néanmoins, la magnitude et la durée de l'effet restent plus importantes dans ce dernier groupe (Bell et McLellan 2002).

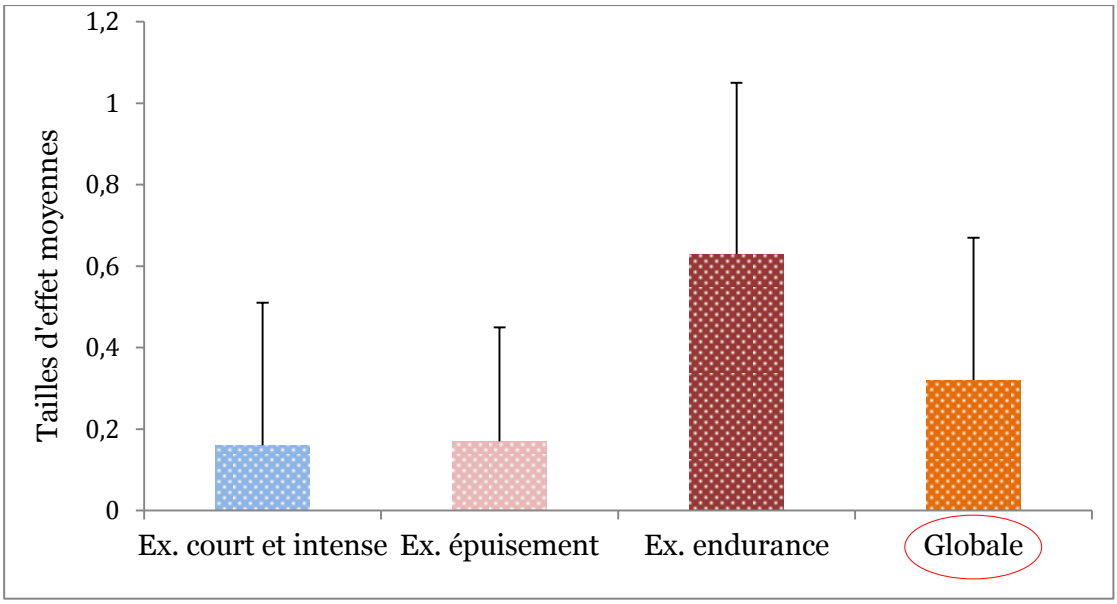

FIGURE 16 – **Tailles d'effet moyennes de l'ingestion de caféine sur la performance lors d'exercice court et intense, d'exercice incrémental jusqu'à épuisement et d'exercice d'endurance**. La taille d'effet « Globale » correspond à la moyenne des ces trois types d'exercice. (Données issues de Doherty et Smith 2005).

Quelques études récentes se sont intéressées à l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche et à son effet sur la performance. Outre sa rapidité d'action, le principal atout de cette technique, réside dans son indépendance face aux facteurs génétiques connus pour entraîner des « bons et mauvais répondeurs » (Pataky et al. 2016). Par ailleurs il est souvent reporté que l'ingestion de caféine peut entraîner, chez certains consommateurs, des effets secondaires d'une façon dose-dépendante. Parmi les principaux, on trouve une apparition de tachycardie, une augmentation de la pression artérielle, un effet diurétique, des tremblements, une confusion mentale, ou encore des troubles du sommeil (Tarnopolsky 2008; Meeusen et al. 2013; Spriet 2014).

A ce jour les études qui ont investigué les effets de la caféine isolée en rinçage de bouche sur la performance physique sont peu nombreuses. Très souvent, la caféine

se trouve associée à des CHO afin d'évaluer l'action synergique des deux composés. Ainsi, nous avons répertorié 10 études, mais seules 7 études présentaient des données suffisantes pour être analysées sous forme de tailles d'effet (Table 2). L'analyse de la littérature indique que l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche permet une amélioration moyenne de la performance de 6,9%, avec un effet de magnitude faible (TE = 0,33). Cet effet semble plus important pour les exercices anaérobies (+12,9% amélioration de la performance, TE= 0,47) et sur les exercices d'endurance inférieurs à 1 heure (+6,6% d'amélioration en moyenne, TE = 0,31) que sur les exercices intermittents (pas de modification de la performance, TE = -0,16).

TABLE 2 – Résumé chronologique des études ayant investigué l'effet de la caféine en rinçage de bouche sur la performance physique en fonction du type d'exercice.

Référence	Type d'exercice	Modalité d'exercice	Durée ex.	Echantillon	Jeûn (h)	Conditions de 1 RB	Durée RB (s)	Fréquence des RB	Nombre de RB total	Résultats (moyenne ± écart type)	Amélioration de la performance	Taille d'effet (d)
Beaven et al. (2013)	répétition sprints	ergocycle	6 s (x 5)	12	2	CAF (1,2%) vs Pl	5	avant chaque sprint	6	Moyenne Puissance S1 (W) Δ Pl = 26,9 ± 26,9	ns, X	0,71
Kizzi et al. (2016)	répétition sprints	ergocycle	6 s (x 5)	8	-- GLY	CAF (2%) vs Pl	6	avant chaque sprint	6	Pic puissance moyenne (W) 643 ± 79 vs 573 ± 79	S, +12%	0,89
	répétition sprints	ergocycle	6 s (x 5)	8	-- GLY	CAF (2%) vs Pl	6	avant chaque sprint	6	Moyenne de puissance (W) 589 ± 80 vs 519 ± 82	S, +14%	0,86
Dolan et al. (2017)	intermittent	course	12-16 min	14	~ 10	CAF (1,2%) vs Pl	10	1	1	Distance (m) 1342 ± 320 vs 1397 ± 360	ns, -3,9%	-0,16
Doering et al. (2014)	TT	ergocycle	60 min	10	1	CAF (35 mg) vs Pl	10	ts les 12,5% course	8	Temps (min) 65,3 ± 4,1 vs 65,6 ± 3,8	ns, 0,56%	0,090
Bottoms et al. (2014)	TT	ergocycle	30 min	12	4	CAF (6,4 mg) vs Pl	5	ts les 20% course	5	Distance (m) 16200 ± 2800 vs 14900 ± 2600	S, +8,7%	0,48
Sinclair & Bottoms (2014)	TT	pédalage bras	30 min	12	4	CAF (0,032%)	5	ts les 20% course	5	Distance (m) 15430 ± 32700 vs 13150 ± 3360	S, +17%	0,69
Pimentel et al. (2017)	TT 10 km	course	X	10	X	CAF vs Pl	10	1	1	Temps (min) 47 ± 6,3 vs 46,8 ± 5,2	ns, -0,40%	0,030

Note : TT = course contre la montre ; s = secondes ; min = minutes ; -- GLY = déplétion glycogénique ; RB = rinçage de bouche ; CAF = caféine ; Pl = placebo ; S1 = sprint n°1 ; S = $p < .05$; ns = $p > .05$; Δ = différence entre les deux conditions ; X = données manquantes dans l'étude. Une taille d'effet et un pourcentage d'amélioration de la performance positifs indiquent une amélioration de la performance physique comparée au Pl, tandis que des valeurs négatives représentent une altération de la performance comparée au Pl.

Enfin à ce jour une seule étude a étudié l'effet de l'utilisation de la caféine sous la forme de pulvérisation nasale sur la performance physique (De Pauw et al. 2017b). Les pulvérisations de caféine (15 $mg.ml^{-1}$) étaient réalisées toutes les 1/4ème de temps d'une course contre la montre de 30 minutes réalisée sur ergocycle. Aucun effet significatif sur la performance d'endurance ou de sprint n'a été indiqué. Seule une amélioration *probable (98%)* de la performance d'endurance est suggérée.

De façon globale, l'analyse actuelle de la littérature semble suggérer que l'ingestion de caféine est particulièrement bénéfique sur la performance d'endurance (+21% d'amélioration de la performance, TE = 0,63) alors que lors d'exercice court et de haute intensité (anaérobie), son utilisation en rinçage de bouche soit à favoriser (+12,9% d'amélioration de la performance, TE= 0,47).

Effet sur la perception de l'effort

Dans une méta-analyse réalisée à partir de 21 études, Doherty et Smith (2005) indiquent que l'ingestion de caféine entraîne, en moyenne, une diminution du RPE au cours de l'exercice de 5,6%, avec un effet de taille modérée (TE = -0,47). Ces auteurs suggèrent que ces variations du RPE pourraient expliquer près d'un tiers de l'amélioration de la performance physique.

Concernant l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche, relativement peu d'études permettent d'identifier l'effet de façon consistante (5 études). Trois études ne trouvent aucune modification du RPE et de la performance physique (Doering et al. 2014; Clarke et al. 2015; Dolan et al. 2017) tandis que deux d'entre elles trouvent

une amélioration de la performance sans augmentation du RPE (Bottoms et al. 2014; Sinclair et Bottoms 2014).

A notre connaissance aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de l'utilisation de la caféine en pulvérisation nasale sur le RPE.

Effet sur la performance cognitive

L'effet de l'ingestion de caféine sur la cognition a été abondamment investigué ces 50 dernières années (pour revues voir Ruxton 2008; McLellan, Caldwell, et Lieberman 2016), et notamment dans le milieu militaire où il a été suggéré que les soldats qui doivent s'engager physiquement et cognitivement dans des activités menées en environnement extrême et en situation de privation de sommeil, pourraient tirer profit de l'ingestion de ce composé (McLellan et al. 2003-2004). Parmi les différents processus cognitifs établis, l'effet de la caféine est reconnu comme prépondérant sur les tâches de vigilance ainsi que sur les tâches de TRS et TRC (pour revue voir McLellan, Caldwell, et Lieberman 2016) au repos ou en situation de privation de sommeil et de stress environnemental (Lieberman et al. 2002). Chez les consommateurs quotidiens, il semblerait que l'effet de la caféine soit plus important dans un état d'abstinence comparé à un état de consommation classique (Addicott et Laurienti 2009). En revanche, ses effets sur les fonctions exécutives et notamment sur le contrôle de l'interférence sont inconsistants selon les études qui relatent une amélioration (Brunyé et al. 2010) ou une absence d'effet (Tieges et al. 2009).

Dans les sciences du sport, les études ayant investigué l'effet d'interaction entre l'ingestion de caféine, l'exercice et la performance cognitive sont beaucoup plus rares.

Une étude s'est intéressée à l'effet de l'ingestion de caféine couplée à des CHO, sur la performance cognitive lors d'un exercice d'endurance de 180 minutes réalisé à 60% de la $\dot{V}O_{2max}$ sur ergocycle, suivi d'un exercice de pédalage jusqu'à épuisement à 75% de la $\dot{V}O_{2max}$ (Hogervorst et al. 2008). Au cours de ce protocole, 24 sujets réalisaient trois sessions contrebalancées correspondant à l'ingestion : de CHO seuls (45 g), de caféine (CAF) et de CHO (100 mg de CAF + 45 g de CHO) et d'un Pl. L'administration des supplémentations nutritionnelles était réalisée sous forme solide, avant le départ puis à 55 minutes et 115 minutes d'exercice. Le contrôle de l'interférence (tâche de Stroop) ainsi que la performance lors d'une tâche d'attention soutenue (« Rapid Visual Information Processing tests », RVIP) étaient évalués avant le départ, à 70 et 140 minutes d'exercice ainsi qu'à la fin de l'exercice d'épuisement. Les résultats indiquent que la condition CAF + CHO améliore le TR de la tâche de Stroop et de la RVIP pendant l'exercice et à la fin de celui-ci comparée à la condition CHO. En revanche aucun effet n'est observé sur l'effet d'interférence. Ces résultats suggèrent donc que l'ingestion couplée de CAF + CHO améliore la vitesse de traitement de l'information mais reste sans effet sur le contrôle de l'interférence. A l'inverse, une autre étude plus ancienne du même groupe (Hogervorst et al. 1999) suggère que l'ingestion de caféine à trois dosages différents (~ 150 mg, 225 mg et 320 mg) couplée à des CHO (~ 68,8 g) diminuerait l'effet d'interférence, comparée à l'ingestion de CHO seuls, après une course contre la montre de 60 minutes réalisée sur ergocycle. Cet effet soutient donc une amélioration du contrôle de l'interférence après l'exercice. Néanmoins, il est à remarquer que dans ces deux études, l'effet de l'ingestion de caféine isolée n'a jamais été mesuré.

A notre connaissance, seules 4 études ont investigué l'effet d'interaction entre l'ingestion de caféine isolée, la performance cognitive et l'exercice (Carr et al. 2008; Bottoms, Greenhalgh, et Gregory 2013; Santos et al. 2014; Ali et al. 2015).

Parmi ces études, l'une d'entre elles a évalué l'effet de l'ingestion de 6 $mg.kg^{-1}$ (~ 400 mg) de caféine sur la performance cognitive après 6 sprints de 20 secondes (Carr et al. 2008). Les résultats indiquent que l'ingestion de caféine, réalisée 60 minutes avant l'exercice, n'a aucun effet sur la performance cognitive mesurée lors de tâches de TRS et TRC. L'étude récente de Ali et al. (2015) confirme aussi ces conclusions. Au cours de ce protocole, l'ingestion de caféine (~ 358 mg) était réalisée 60 minutes avant le début d'un exercice de course intermittent, d'une durée de 2 x 45 minutes. La performance cognitive était mesurée dès la fin des deux périodes de course, avec l'utilisation d'une tâche de TRC et de Stroop. Aucun effet significatif n'a été observé, même si une amélioration tendancielle du TR pour la tâche de TRC a été suggérée ($p = .087$).

L'étude de Santos et al. (2014) est la seule à indiquer un effet bénéfique de l'ingestion de la caféine sur la performance cognitive après un exercice. Au cours de ce protocole, 10 athlètes ingéraient 5 $mg.kg^{-1}$ (~ 386 mg) de caféine ou un Pl, puis performaient 60 minutes plus tard 2 combats de Taekwondo de 2 minutes, espacés de 20 minutes. La mesure de TR, spécifique à la discipline, représentait la moyenne des durées de 5 essais, entre l'apparition d'un stimulus lumineux et le déclenchement d'un mouvement de hanche des sujets lors d'une simulation de frappe. Le TR était mesuré avant le premier combat puis dès la fin du 1er et 2ème combat. Les résultats indiquent que le TR de la condition caféine est plus rapide comparé à celui du Pl avant le premier combat (-11,9%, $\Delta = 50$ ms, $p = .004$), alors qu'aucun effet n'est indiqué après le 1er et 2nd combat (respectivement $p = .58$ et $p = .28$). Il a été conclu

par les auteurs que l'ingestion de caféine permet d'améliorer la vitesse de traitement de l'information mais seulement en l'absence de fatigue.

Bottoms, Greenhalgh, et Gregory (2013) ont investigué l'effet de l'ingestion de caféine sur le contrôle de l'interférence. Au cours de ce protocole, la performance cognitive lors de la tâche de Stroop était mesurée après l'ingestion de 3 $mg.kg^{-1}$ de caféine (~ 210 mg) et avant une épreuve de 6 combats d'escrime d'une durée totale de 60 minutes, ainsi qu'après cet exercice. Les résultats indiquent que la caféine n'affecte pas la performance cognitive comparée au Pl quel que soit le moment de passation. Ces résultats sont cohérents à ceux d'une autre étude ayant investigué l'effet de la caféine dans des conditions similaires (Ali et al. 2015).

Ainsi malgré la large utilisation de la caféine en ingestion dans le milieu sportif, relativement peu d'études ont étudié et validé les effets sur le traitement de l'information sensorimotrice ou sur le contrôle de l'interférence. A ce jour les résultats semblent peu concluants même s'il est important de souligner qu'aucun de ces protocoles n'a évalué l'effet de la caféine sur le contrôle cognitif pendant un exercice.

La question de l'effet de la caféine en rinçage de bouche ou en aérosols sur la performance cognitive a aussi été très peu investiguée. De Pauw et al. (2015) ont étudié l'effet d'un rinçage de bouche en caféine de 25 ml, dosé à 1,2% et réalisé pendant une durée de 20 secondes sur la performance lors d'une tâche de Stroop au repos. Les résultats suggèrent qu'il n'existe aucune différence pour les valeurs de TR et de précision entre les deux conditions. Compte tenu de la faible taille de l'échantillon (n = 10), l'utilisation de statistiques qualitatives (Hopkins et al. 2009) a néanmoins montré que la caféine aurait un effet *bénéfique probable* (61,6%) sur le

TR des essais incongruents, ce qui semble suggérer une amélioration du contrôle de l'interférence. Cet effet n'est pas retrouvé dans la condition Pl (*probablement trivial*, 63,5 %). A notre connaissance aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de la caféine en rinçage de bouche sur la performance cognitive pendant ou après un exercice.

Concernant l'effet de la caféine en spray nasal sur la performance cognitive, deux études du même groupe ont investigué son effet sur le contrôle de l'interférence (tâche de Stroop) au repos (De Pauw et al. 2017a) et à la suite d'un exercice de sprint de 20 secondes et d'endurance de 30 minutes (De Pauw et al. 2017b). Les résultats de ces deux études ne montrent aucun effet significatif sur la performance cognitive.

2.2. Effets de la caféine sur la performance: hypothèses explicatives

En ingestion

La caféine est un composé naturel rencontré dans de nombreuses boissons (e.g., thé, café, sodas, boissons énergisantes) et aliments (e.g., chocolat). Bien qu'il ait été suggéré qu'une faible quantité de caféine puisse être absorbée par la muqueuse buccale, le principal mécanisme d'absorption de la caféine est médié par le tissu digestif d'où elle diffuse dans tous les tissus. La caféine apparaît dans le sang entre 5 et 15 minutes après ingestion, avec un pic de concentration plasmatique situé entre 40 et 80 minutes (Spriet 2014). Son temps de demi-vie est d'environ 2 heures 30 à 4 heures 30 (Fredholm 1995). Pour une efficacité maximale, il a été proposé que son ingestion soit réalisée 3 heures avant un exercice de puissance, de sprint ou d'endurance très court, et une 1 heure avant les exercices d'endurance (pour revue voir Sökmen et al. 2008). De larges différences individuelles dans la réponse à la

caféine ont été recensées en fonction du sexe, de la prise de contraceptif, de l'âge ou encore de facteurs génétiques (Pataky et al. 2016).

L'efficacité d'une ingestion de 3 $mg.kg^{-1}$ (~ 200 mg) a été montré sur le maintien de la performance cognitive en situation de privation de sommeil et ses effets semblent persister jusqu'à 8 heures après l'ingestion (Lieberman et al. 2002). Néanmoins certaines études évoquent la nécessité d'augmenter le dosage ingéré, notamment avec des consommateurs quotidiens (> 400 mg par jour) ou lors d' exposition à un stress sévère (Bell et McLellan 2002; McLellan, Caldwell, et Lieberman 2016). Dans ce cadre, l'ingestion de caféine à des dosages modérés et forts (~ 6 à 13 $mg.kg^{-1}$), est connue pour entraîner un certains nombres de réponses physiologiques délétères qui peuvent altérer la performance. Parmi les principales, on retrouve des augmentations conséquentes de la fréquence cardiaque, de la libération de catécholamines plasmatiques, l'augmentation du taux de lactate et de glycérol ainsi que de la part d'acides gras libres dans le plasma (pour revue voir Spriet 2014).

Plusieurs hypothèses ont été proposées afin d'expliquer les effets positifs de la caféine sur la performance (Cappelletti et al. 2015; Glaister et Gissane 2017). Bien que celles-ci restent encore à clarifier, l'hypothèse actuelle la plus souvent avancée repose sur l'influence de la caféine au niveau du système nerveux central, notamment par son action antagoniste aux récepteurs de l'adénosine (Davis et al. 2003). Cette hypothèse permettrait d'expliquer les effets bénéfiques sur la performance physique ainsi que sur la performance cognitive.

L'adénosine est un neuromodulateur présent dans de nombreuses aires du cerveau dont l'action inhibe l'excitabilité centrale, notamment en diminuant la libération de plusieurs neurotransmetteurs excitateurs tels que la dopamine (DA), et

en diminuant la fréquence de décharge des neurones centraux (Kalmar 2005). Ces changements sont associés à une diminution de l'éveil, une augmentation de la fatigue et une suppression des activités comportementales spontanées (Davis et al. 2003).

Après son ingestion, la caféine franchit rapidement la barrière-hémato-encéphalique ce qui permet une augmentation rapide de sa concentration dans l'intégralité du système nerveux central. La structure de la caféine étant similaire à celle de l'adénosine, il a été suggéré qu'en se fixant sur des récepteurs spécifiques à ce neuromodulateur, la caféine stimule la libération de nombreux neurotransmetteurs dans le système nerveux central (Meeusen, Roelands, et Spriet 2013), qui seraient favorables aussi bien à la performance physique qu'à la performance cognitive (Tarnopolsky 2008; Meeusen, Roelands, et Spriet 2013; Fredholm 1995; McLellan, Caldwell, et Lieberman 2016).

Sur la cognition, l'effet de la caféine serait lié au blocage des récepteurs à l'adénosine A_1, répartis dans l'ensemble des aires cérébrales et notamment l'hippocampe, le cortex cérébral et le cervelet (Fredholm 1995). En effet, l'ingestion de caféine est connue pour entraîner une action corticale électroencéphalographique similaire à celle produite par la stimulation directe de la formation réticulée (Fredholm et al. 1999). Par ailleurs il a été proposé que la caféine entraîne une augmentation de l'activité dopaminergique dans les zones ayant des innervations dopaminergiques denses telles que le CCA et le cortex préfrontal, qui sont impliquées dans les fonctions exécutives (Brunyé et al. 2010).

Il a été proposé que la caféine affecte la performance physique à travers une action sur les voies motrices (Meeusen, Roelands, et Spriet 2013). En effet, plusieurs noyaux clés impliqués dans le contrôle du mouvement et riches en DA, à savoir les

ganglions de la base et le noyau accumbens, pourraient être impactés par le blocage des récepteurs à l'adénosine A_{2A} par la caféine, et ainsi affecter la performance à travers leurs projections sur le cortex moteur. A ce titre, la caféine pourrait améliorer la commande centrale en augmentant l'excitabilité corticale et l'activation volontaire, ce qui augmenterait la production de force maximale (Burke et al. 2013). Au-delà de l'hypothèse liée au mécanisme d'inhibition à l'adénosine, plusieurs hypothèses non exclusives ont été également proposées.

D'une part, l'effet ergogénique de la caféine sur la performance physique pourrait être lié à son action métabolique. En effet, la caféine est aussi un inhibiteur non spécifique de l'enzyme phosphodiestérase, que l'on sait impliquée dans le catabolisme de nucléotides cycliques et dans la lipolyse. L'ingestion de ce composé est responsable d'une augmentation de l'oxydation lipidique permettant une épargne du glycogène ainsi qu'une facilitation de l'absorption du glucose par l'intestin qui pourrait augmenter la quantité de CHO délivrée aux muscles lors d'un exercice et faciliter la synthèse glycogénique (Essig et al. 1980). D'autre part, la caféine a une action sur la contraction musculaire et la production de force, notamment en influençant les différentes étapes du couplage excitation-contraction (Lindinger, Graham, et Spriet 1993). Néanmoins, il semblerait que l'ensemble de ces hypothèses explicatives ne soient pas validées expérimentalement lors d'administrations de faibles doses de caféine ($\leq$ 3 $mg.kg^{-1}$ ou ~ 200 mg), qui sont celles classiquement consommées par les sportifs (Lindinger, Graham, et Spriet 1993). De plus, les études réalisées in vitro suggèrent que ces effets ne seraient effectifs que pour des dosages toxiques pour l'humain (Figure 17).

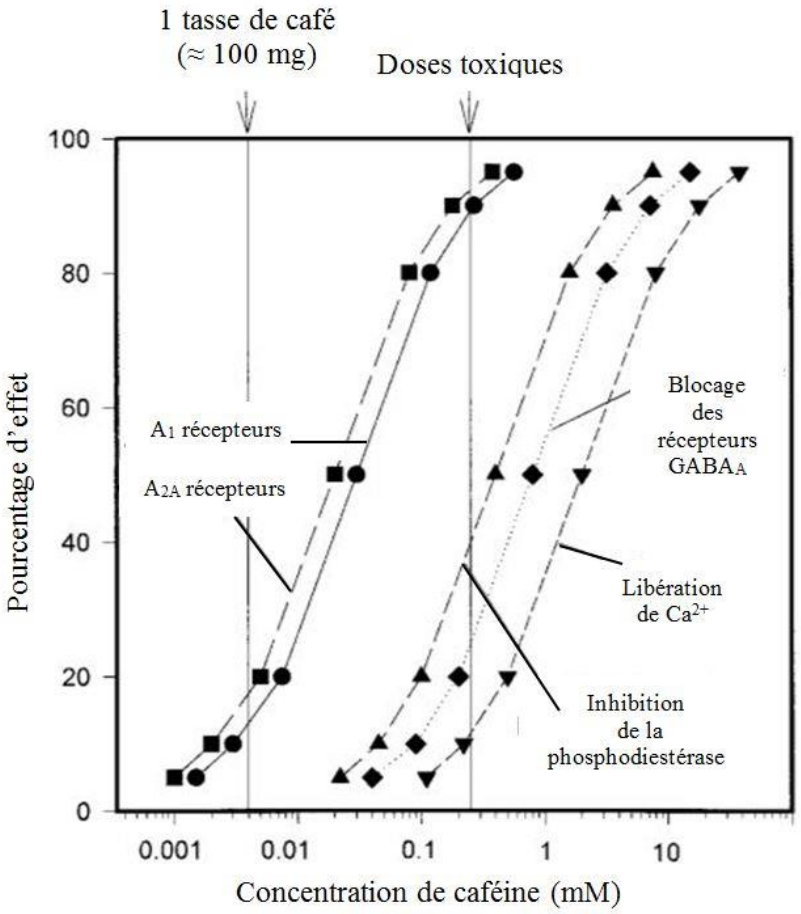

FIGURE 17 – **Effets de la caféine sur différentes cibles chimiques en fonction de sa concentration chez l'humain**. Pour que la caféine exerce une inhibition sur l'enzyme phosphodiestérase ou augmente la libération de calcium (Ca^{2+}), la concentration devra être respectivement 20, 40 et 100 fois plus importante que celle nécessaire pour bloquer l'action des récepteurs A1 et A_2A (Issu de Fredholm et al. 1999).

L'influence de la caféine à la fois sur la performance cognitive et physique peut être également reliée à son effet sur le noyau accumbens, qui régule la motivation et le comportement, ou encore à son influence sur le système nociceptif en modulant la libération de beta-endorphines ou d'autres hormones impliquées dans la sensation de douleur et d'inconfort au cours de l'exercice (Burke, Desbrow, Spriet 2013).

Sans ingestion : chewing-gum, rinçage de bouche et aérosols

Plus récemment, les études scientifiques ont porté sur d'autres techniques d'administration de la caféine principalement en raison de la possibilité d'effets secondaires de son ingestion, de la grande variabilité interindividuelle de ses effets ainsi que des résultats probants sur l'utilisation des hydrates de carbone en rinçage de bouche. A ce titre, quelques études se sont intéressées à son utilisation sous la forme de chewing-gum, de rinçage de bouche ou encore d'aérosol diffusés dans les voies buccales ou nasales (pour revue voir Wickham et Spriet 2018). Le principal bénéfice du chewing-gum, réside dans l'augmentation de la vitesse d'absorption de la caféine par la cavité buccale, comparée à celles par l'intestin et le foie (respectivement ~ 44 à 80 minutes vs ~ 84 à 120 minutes) et cela sans différence dans les concentrations plasmatiques maximales entre les deux modes d'administration (Kamimori et al. 2002).

Les études qui ont investigué l'effet de la caféine sous forme de rinçages de bouche ou d'aérosols, proposent plusieurs hypothèses explicatives différentes de celles lors de l'ingestion. Ces études suggèrent que les effets de la caféine en rinçage de bouche ne seraient pas médiés par un passage à travers la muqueuse buccale (Doering et al. 2014) mais plutôt par un groupe de récepteurs buccaux connus sous le nom de « TASTE 2 receptors » (« TAS2R » ou « T2Rs ») (Behrens et Meyerhof 2006). Le goût amer que représente la caféine, semble être le plus complexe parmi les 5 goûts de base notamment en raison de la capacité d'un petit groupe de T2Rs à reconnaître des milliers de composés amers de structures diverses (Brockhoff et al. 2010). Il a aussi été montré que la présence de solution amère dans la cavité buccale entraîne la plus grande et la plus longue réponse sympathique, sans doute pour

protéger l'organisme d'une potentielle ingestion de substance toxique (Rousmans et al. 2000).

L'étude récente de De Pauw et al. (2015), présentée précédemment dans la revue de littérature précédente (chapitre 2, § II, p 85) suggère que la présence de caféine dans la cavité buccale serait responsable d'une augmentation de l'activation de plusieurs zones cérébrales, dont le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) et le cortex orbitofrontal (COF), qui n'est pas retrouvée dans la condition Pl ainsi que dans la condition CHO. Le CPFDL est une structure corticale engagée dans la résolution d'un conflit qui apparaît dans les essais incongruents présents dans la tâche de Stroop notamment. En effet, il semblerait que dès la détection d'un conflit par le cortex cingulaire antérieur (CCA), le CPFDL soit engagé à son tour dans la résolution de ce conflit (Carter et van Veen 2007). Si le CCA possède un rôle d'évaluation, il semblerait que le CPFDL possède un rôle d'implémentation du contrôle cognitif et permette de mettre en jeu des mécanismes de régulation liés à l'élaboration de comportements adaptés à la tâche (Botvinick, Cohen, et Carter 2004; Ridderinkhof et al. 2004; MacDonald et al. 2000).

A ce jour, plusieurs hypothèses explicatives des effets de l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche sur la performance physique ont été émises. D'une part, il a été proposé que l'activation de ces zones cérébrales du système limbique impliquées dans les processus émotionnels, puissent neutraliser les signaux de fatigue provenant de la périphérie impliqués dans la diminution de l'intensité d'exercice. D'autre part, il a été suggéré que la présence de substances amères dans la cavité buccale augmente l'excitabilité de voie cortico-motrice, ce qui faciliterait la performance notamment lors de répétitions de sprints (Gam et al. 2015).

EN RESUME

La caféine est un composé chimique consommé dans le monde entier, et présent dans de nombreuses boissons et aliments.

Les 20 dernières années, la recherche en sciences du sport s'est largement intéressée à ce composé en ingestion. L'effet sur la performance physique est positif et de magnitude faible (~ 12% d'amélioration, TE = 0,31) même pour de faibles dosages (~ 3 $mg.kg^{-1}$). Cet effet semble être plus important et de magnitude modérée pour les exercices d'endurance inférieurs à 1 heure (~ 21% d'amélioration, TE = 0,63).

Même si les mécanismes d'action en ingestion restent à clarifier, il semblerait que ces effets soient médiés par une action antagoniste aux récepteurs d'adénosine qui permettrait la libération de neurotransmetteurs dans de larges régions de l'encéphale. Plusieurs paramètres tels qu'une diminution de la douleur et de la perception de l'effort, une augmentation de la motivation, une augmentation de l'excitabilité cortico-motrice peuvent intervenir dans l'effet ergogénique de la caféine sur la performance physique.

Néanmoins, de grandes variabilités interindividuelles ont été recensées en fonction du sexe, des variations génétiques, du dosage ainsi que du moment de la journée d'administration. La possibilité d'effets secondaires a également entraîné l'émergence de l'utilisation de la caféine sous des formes alternatives : le rinçage de bouche et plus récemment la pulvérisation nasale.

L'effet de la caféine en rinçage de bouche sur la performance physique reste cependant encore peu étudié pour identifier des effets consistants. L'effet rapporté est faiblement positif (~ +7%, TE = 0,33) mais il est supérieur et modéré lors d'exercices de type anaérobie (~ +13%, TE = 0,47). Les mécanismes explicatifs impliquent des récepteurs au goût amer situés dans la cavité buccale qui, similairement aux CHO, pourraient activer certaines zones cérébrales et potentiellement améliorer la performance. A ce jour, l'effet sur la performance cognitive au repos n'est pas validé et aucune étude n'en a investigué l'effet à l'exercice.

III - Guarana

3.1. *Effets du guarana sur la performance*

Le guarana est une plante provenant des forêts amazoniennes du Brésil, consommée depuis des siècles par les tribus indiennes notamment pour ses vertus thérapeutiques. On lui attribue un large spectre de possibilités s'étalant d'une action psychostimulante à des actions diurétiques, anti-névralgiques ou encore antidiarrhéiques (Mattei et al. 1998). De nos jours, la présence de guarana se retrouve dans la composition de nombreux suppléments nutritionnels proposés aux sportifs ou aux non sportifs.

Ces 20 dernières années, plusieurs travaux ont tenté de valider expérimentalement les effets décrits de façon empirique pour le guarana. Les premiers travaux, réalisés sur des modèles animaux, indiquent un effet bénéfique de l'ingestion de guarana sur l'activité motrice, ainsi que sur certains processus cognitifs (apprentissage et mémoire) et sur l'humeur, tout en étant dépourvu de toxicité (Espinola et al. 1997; Mattei et al. 1998). Plus récemment Kennedy et al. (2004) ont été les premiers à montrer les effets bénéfiques de l'ingestion aiguë de guarana sur la performance cognitive humaine. Au cours de ce protocole, 28 sujets ont ingéré, en une seule prise, 75 mg de guarana ou un Pl. Les effets sur la performance cognitive étaient mesurés par une batterie de tests (« Cognitive Drug Research », CDR) regroupant des mesures de TRS, de TRC, de vigilance, ainsi que des tâches de mémoire et de raisonnement. L'ensemble de ces mesures était réalisé avant ingestion, puis 1 heure, 2.5 heures, 4 heures et 6 heures après l'ingestion. Les résultats

indiquent un effet bénéfique du guarana sur la performance cognitive notamment de vigilance et de mémorisation, jusqu'à 6 heures après l'ingestion.

Dans une seconde étude de la même équipe, Haskell et al. (2007) ont investigué les effets de différentes doses de guarana (37,5 mg, 75 mg, 150 mg et 300 mg) sur la performance cognitive dans un protocole au design expérimental similaire à celui de l'étude précédente (Kennedy et al. 2004). Les résultats suggèrent que seuls les dosages les plus faibles (37,5 mg et 75 mg) améliorent la performance de mémorisation comparés au Pl.

A notre connaissance une seule étude a étudié l'effet d'interaction entre le guarana, la performance cognitive et l'exercice (Veasey et al. 2015). Ces auteurs ont évalué l'effet de l'ingestion d'un complexe de guarana (222,2 mg) associé à des vitamines et minéraux sur la performance cognitive mesurée par une batterie de test (COMPASS, Université de Northumbria à Newcastle). Les mesures cognitives étaient réalisées avant, dès la fin de l'exercice, et 60 minutes après la fin d'un exercice de course de 30 minutes réalisé à 60% $\dot{V}O_{2max}$. La perception de l'effort était aussi évaluée au cours de l'exercice par l'échelle 6-20 de Borg (Borg 1982). Les résultats de cette étude indiquent que l'ingestion aiguë de guarana permet une amélioration des performances de mémorisation avant et après l'exercice, qui perdure jusqu'à 90 minutes après l'ingestion. Aucun effet sur la mémoire de travail, les tâches décisionnelles ou l'attention n'est observé. Par ailleurs, aucun effet d'interaction entre les supplémentations nutritionnelles (Pl vs guarana) et la condition (repos vs dès la fin de l'exercice vs 60 minutes après la fin de l'exercice) n'est trouvé pour les variables cognitives. Il a été suggéré que l'effet positif de la nutrition sur la mémorisation soit

indépendant de l'exercice. Les résultats indiquent aussi une diminution significative ($p = .14$) de la perception de l'effort suite à l'ingestion du complexe de guarana.

Malgré des résultats intéressants, il est à remarquer que ces trois études proviennent de la même équipe scientifique, et il est donc nécessaire de mener de plus amples recherches afin de valider l'intérêt de l'utilisation du guarana chez le sportif. Par ailleurs à ce jour, aucune étude n'a investigué l'effet de l'ingestion de guarana sur le traitement de l'information ou le contrôle de l'interférence au cours d'un exercice. De plus, ses effets lors d'une administration en rinçage de bouche restent aussi inexplorés.

3.2. Effets du guarana sur la performance : hypothèses explicatives

Le guarana est obtenu à partir des graines séchées de la plante amazonienne *Paullinia cupana*. Il est majoritairement composé d'alcaloïdes dont les principaux sont la caféine, la théophylline et la théobromine ainsi que des polyphénols regroupant des flavonoïdes, tannins et saponines (Espinola et al. 1997). Avec une teneur d'environ 2,5% à 6,5% de caféine dans ses graines, le guarana est la plante possédant la plus grande quantité de caféine (Schimpl et al. 2013). Par conséquent, les hypothèses explicatives des effets psychostimulants du guarana ont donc rapidement été attribuées à sa teneur élevée en caféine. Néanmoins, il a d'abord été constaté chez l'animal (Espinola et al. 1997 ; Campos et al. 2005), puis chez l'homme (Kennedy et al. 2004; Haskell et al. 2007) que les effets bénéfiques du guarana étaient effectifs pour des doses de caféine très faibles, ne permettant pas d'expliquer les effets obtenus. Ces doutes ont été confirmés dans une étude chez l'animal où il a

été suggéré que contrairement à la caféine, le mécanisme d'action du guarana n'était pas basé sur une action antagoniste aux récepteurs à l'adénosine (Campos et al. 2005).

Très récemment, il a été proposé que l'effet du guarana soit induit par sa teneur en polyphénols et plus particulièrement en tannins et flavonoïdes. Les polyphénols sont des micronutriments utilisés par les plantes comme composés de défense chimique contre les prédateurs. Même si leur goût est fortement amer, l'ingestion à faible dose n'est pas nocive chez l'homme. Il a été proposé que ces composés au fort pouvoir antioxydant, soient impliqués dans des processus de modulation de la plasticité synaptique et dans une augmentation du flux cérébral pouvant améliorer la performance cognitive (Rendeiro, Rhodes, et Spencer 2015). En outre, l'association fréquente du guarana avec des complexes multi-vitaminés, connus aussi pour influencer le fonctionnement cognitif (Huskisson, Maggini, et Ruf 2007), enrichie les possibles mécanismes d'action. A ce jour, s'il existe un consensus de synergie d'action entre les différents composés, plus d'études sont nécessaires afin de déterminer de façon exacte les mécanismes d'action impliqués.

EN RESUME

Le guarana est une plante issue d'Amérique centrale dont les propriétés psychostimulantes sont de plus en plus prisées dans le monde sportif. Avec une teneur en caféine qui peut avoisiner les 7%, le guarana est aussi la plante contenant le plus de caféine.

Dans la très grande majorité des compositions, le guarana est consommé en association avec des vitamines, minéraux et parfois du ginseng. Ses effets sur la performance cognitive sont bénéfiques même en ingestion aiguë à de faibles dosages, ce qui suggère que son action résulterait plus d'une synergie d'action de ses composés que de l'action de la caféine elle-même. Néanmoins, à ce jour les effets du guarana sur la performance cognitive lors de l'exercice, ainsi que les mécanismes d'actions restent à approfondir.

SECONDE PARTIE :

CONTRIBUTION EXPERIMENTALE

Hypothèses et objectifs

L'analyse de la revue de littérature résumée dans les chapitres précédents, indique que l'exercice physique aigu entraîne une amélioration de la performance cognitive de faible magnitude. Cet effet est modulé par le moment de passation et la nature de la tâche cognitive, les caractéristiques de l'exercice physique ainsi que celles des sujets. Néanmoins, la littérature actuelle fait état d'un consensus selon lequel l'exercice d'intensité modérée et de durée limitée (< 60 minutes) entraîne un effet positif dans le plus grand nombre de conditions expérimentales. Selon notre hypothèse, cet effet est principalement médié une augmentation du niveau d'éveil, en réponse à une augmentation de la libération de catécholamines cérébrales.

Par ailleurs, il a été montré que certaines supplémentations nutritionnelles ont le potentiel d'améliorer la performance physique en modifiant le fonctionnement cérébral, mais aussi de retarder l'apparition d'une fatigue centrale en modifiant la synthèse de neurotransmetteurs. A ce titre, le questionnement inhérent à ce travail de thèse a été de savoir si l'utilisation de supplémentations nutritionnelles pouvait potentialiser les effets bénéfiques de l'exercice sur le fonctionnement cognitif.

Les effets des stratégies nutritionnelles sur les aspects cognitifs au cours de l'exercice ont surtout été étudiés à partir de l'évaluation de la perception de l'effort (RPE) (Borg 1982), où il a été montré que l'ingestion de certaines supplémentations nutritionnelles diminuait le RPE. A ce jour, l'efficacité de l'apport de différents suppléments sur le traitement de l'information sensorimotrice et le contrôle de

l'interférence, dans un contexte exigeant à la fois en termes de sollicitation physique et de charge cognitive, reste peu explorée.

Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de supplémentations nutritionnelles au cours d'un exercice modéré peut améliorer le traitement de l'information sensorimotrice. Concernant le contrôle de l'interférence, notre conjecture est plus modérée puisque les résultats de la littérature restent à ce jour peu éloquents. Il semblerait que ce type de contrôle soit relativement robustes à l'effet de l'exercice (Davranche, Brisswalter, et Radel 2015; Schmit et al. 2015; Tempest et al. 2017). Une étude ayant investigué l'effet de l'ingestion de 100 mg de caféine au repos sur le contrôle cognitif (mémoire de travail) et sur l'activation cérébrale à travers l'utilisation de l'IRMf, suggère que la caféine modulerait l'activité neuronale de plusieurs zones cérébrales impliquées dans le contrôle cognitif et notamment le CCA (Koppelstaetter et al. 2008). Néanmoins, les résultats concernant l'effet de l'ingestion de caféine au repos restent divergents entre l' étude qui indique un amélioration du contrôle de l'interférence (Brunyé et al. 2010) et celle qui n'en trouve pas (Tieges et al. 2009). Dans ce cadre, nous souhaiterions investiguer l'effet d'interaction entre la nutrition, l'exercice et le contrôle de l'interférence, domaine qui a été très peu étudié dans le champ de la recherche sportive. Le contrôle de l'interférence nous paraît prépondérant puisque, dans de nombreuses disciplines, la performance du sportif est directement reliée à sa capacité à sélectionner les informations les plus importantes, ou à inhiber les réponses qui résulteraient de la prise en compte d'informations inappropriées.

Par ailleurs, le traitement temporel a aussi été investigué. D'une part car il s'agit d'une fonction essentielle qui permet d'encoder les propriétés temporelles des

évènements, de construire des représentations et de les utiliser pour l'action, mais aussi car ce paradigme est classiquement utilisé pour évaluer de façon indirecte des variations du niveau d'éveil. A notre connaissance, seule une étude a investigué l'effet de l'exercice sur le traitement temporel (Lambourne 2012), et aucune ne s'est intéressée à l'effet d'interaction entre la nutrition, l'exercice et le traitement temporel.

Au cours de nos travaux expérimentaux, plusieurs variables méthodologiques connues pour influencer l'effet de l'exercice sur la cognition ont été contrôlées. Dans ce cadre, des exercices sous-maximaux et de durées inférieures à 1 heure ont été préférentiellement réalisés afin de minimiser les effets de fatigue et limiter la possible altération de la performance cognitive. Par ailleurs, seuls des athlètes de haut niveau ou des personnes entrainées ont participé à ces protocoles expérimentaux. Enfin, en condition de double tâche, l'exercice de pédalage a été préféré à celui de course afin de limiter le coût attentionnel de la tâche physique et favoriser une meilleure allocation des ressources attentionnelles vers la tâche cognitive.

La première étude de ce travail de thèse avait pour objectif d'évaluer l'effet de l'ingestion d'une supplémentation nutritionnelle au repos, à laquelle on attribue des vertus psychostimulantes, le guarana. En effet, cette supplémentation est largement utilisée par les sportifs et par de nombreux consommateurs mais à ce jour très peu d'études en ont investigué l'effet sur la performance d'une tâche décisionnelle. Par ailleurs, l'effet de l'ingestion de guarana sur l'activité du système nerveux autonome reste aussi inexploré.

Dans un second temps, nous avons souhaité investiguer l'effet de l'ingestion d'une solution de CHO et d'un complexe créatine + guarana sur les performances

physique et cognitive lors de répétitions de sprints. En effet, les récentes études qui suggèrent une action centrale des CHO, soulèvent des questions quant à son effet sur la performance lors d'exercices anaérobies. Par ailleurs, nous avons voulu vérifier si l'effet bénéfique de l'ingestion aiguë d'un complexe de guarana multivitaminé sur la performance cognitive indiqué dans l'étude n°1, était aussi présent suite à une sollicitation physiologique. Au cours de ce protocole, l'ingestion de guarana a été couplée à celle d'un complexe de créatine monohydrate, qui se rapproche des substances classiquement consommées par certains sportifs. La créatine est un acide aminé stocké dans les muscles squelettiques qui provient de sources endogènes et exogènes. Il a été montré que l'augmentation de la quantité de créatine stockée dans les muscles permet d'augmenter la vitesse de régénération des stocks d'adénosine triphosphate lors d'exercices répétés de haute intensité, avec de faibles périodes de récupération (Close et al. 2016). Dans ce type d'exercice, la performance repose fortement sur l'efficacité de la voie anaérobie alactique (système créatine-phosphocréatine) dans les 10 premières secondes de la contraction (Tarnopolsky 2010). Notre hypothèse était qu'une supplémentation aiguë en créatine monohydrate améliorait la performance lors de répétitions de sprints, tandis que l'action psychostimulante du guarana pouvait favorablement influencer la performance cognitive.

Par la suite, notre attention s'est portée sur l'utilisation du rinçage de bouche. Comme nous l'avons expliqué dans notre revue de littérature, cette méthode d'utilisation s'inscrit pleinement dans un mécanisme central, et présente des avantages liés à l'absence d'action métabolique. Pour la première fois, l'effet de CHO, de caféine et de guarana en rinçage de bouche sur le fonctionnement cognitif au cours d'un exercice sous-maximal a été investigué.

Enfin dans une dernière étude, nous avons souhaité évaluer l'effet de ces mêmes supplémentations nutritionnelles sur le fonctionnement cognitif et sur la performance de tirs au pistolet, chez des athlètes de haut niveau en Pentathlon Moderne.

Etude n°1 : Evaluation de la performance cognitive et de la variabilité cardiaque après l'ingestion d'une supplémentation multivitaminée et riche en minéraux ajoutée de guarana (Paullinia Cupana)

L'analyse de la littérature suggère que la consommation d'un complexe de guarana multivitaminé est associée à des effets bénéfiques sur des tâches de vigilance et de mémorisation. Néanmoins l'effet sur la performance d'une tâche décisionnelle reste méconnu. De plus, une zone d'ombre subsiste autour de l'implication de la caféine contenue dans le guarana dans les effets escomptés.

L'objectif de cette étude est d'investiguer l'effet de l'ingestion aiguë de guarana, associée à un complexe multivitaminé et riche en minéraux, sur la performance cognitive au repos mais sous une importante charge mentale, ainsi que sur le fonctionnement du système nerveux autonome à travers l'analyse de la variabilité cardiaque.

Cinquante-six sujets (24 femmes, 32 hommes) ont réalisé chacun 3 sessions expérimentales, correspond à l'ingestion randomisée d'un complexe de guarana, vitamines et minéraux (Ac, 300 mg) commercialisé et largement consommé par les athlètes, ainsi que d'une solution de caféine (C, 100 mg) et d'un placebo (Pl). Les sessions étaient réalisées à la même heure de la journée et dans des conditions d'abstinence à la caféine similaires. Seule la boisson ingérée différait entre les sessions expérimentales. La performance cognitive était mesurée lors d'une tâche de TRS et d'une tâche de Go/Nogo avant ingestion, puis toutes les 15 minutes pendant une durée de 180 minutes. Les données électrocardiographiques étaient enregistrées 5 minutes avant chaque passage de la tâche cognitive. Deux indices de la variabilité

cardiaque, le RMSSD et le HF considérés comme des indices de l'activité du système nerveux parasympathique respectivement du domaine temporel et fréquentiel étaient calculés (Young et Benton 2018).

Les résultats indiquent que la condition Ac est la seule supplémentation à entraîner une diminution du TR lors de la tâche de Go/Nogo. Cet effet apparaît dès 30 minutes et se maintient jusqu'à 90 minutes après l'ingestion, avec un effet maximal situé à 45 minutes (+5%, Δ = 15 ms). Le TR est aussi significativement plus faible dans la condition Ac que dans la condition C de 45 à 90 minutes après ingestion, avec un effet maximal à 60 minutes (+6%, Δ = 30 ms). Aucun effet n'est observé sur la précision, ce qui suggère que l'amélioration de la vitesse du traitement de l'information sensorimotrice n'est pas induit par une modification stratégique du sujet. Classiquement, l'augmentation de la charge mentale inférée par la répétition de la tâche est responsable d'une détérioration de la vitesse de traitement lors de la tâche de Go/Nogo à la fin de l'expérimentation dans les trois conditions (Pl : -8%, Δ = 28 ms ; C : -8%, Δ = 29 ms et Ac : -6%, Δ = 20 ms). Néanmoins cette détérioration apparaît plus tard dans la condition Ac (150 minutes, -5%, Δ = 18 ms) que dans les conditions C (120 minutes, - 7%, Δ = 23 ms) et Pl (90 minutes, -6%, Δ = 22 ms).

Aucun effet de la nutrition n'est observé sur la performance de la tâche de TRS. Seule la charge mentale induite par la répétition de la tâche est responsable d'une détérioration de la vitesse de traitement de l'information dès 45 minutes (Pl : -16%, Δ = 36 ms, C : -14%, Δ = 31 ms et Ac : -11%, Δ = 26 ms).

Enfin, les deux indices de la variabilité cardiaque indiquent une diminution de l'activité du système nerveux parasympathique dans les trois conditions. Les

diminutions interviennent dès 30 minutes post-ingestion pour le Pl (RMSSD : 8% ; HF : -12%), dès 45 minutes pour la condition C (RMSSD : -6% ; HF : -10%) et 60 minutes dans la condition Ac (RMSSD :-5% ; HF : -6%). Néanmoins, dans la condition Ac, la diminution est significativement moindre comparée à la condition C de 45 à 90 minutes après ingestion pour le RMSSD, et de 45 à 60 minutes après ingestion pour HF.

Pomportes, L., Davranche, K., Brisswalter, I., Hays, A., Brisswalter, J. Heart rate variability and cognitive function following a multi-vitamin and mineral supplementation with added Guaranà (Paulliniacupana). *Nutrients*. 2014 Dec 31;7(1):196-208. doi: 10.3390/nu7010196.

Nutrients **2015**, *7*, 196-208; doi:10.3390/nu7010196

OPEN ACCESS

nutrients

ISSN 2072-6643

www.mdpi.com/journal/nutrients

Article

Heart Rate Variability and Cognitive Function Following a Multi-Vitamin and Mineral Supplementation with Added Guarana (*Paullinia cupana*)

Laura Pomportes [1,4], Karen Davranche [2], Ioanna Brisswalter [1], Arnaud Hays [3,4] and Jeanick Brisswalter [1,*]

[1] Laboratory of Human Motricity, Education, Sport and Health (EA 6309), University of Nice Sophia Antipolis, Nice 06205, France; E-Mails: laurapomportes@hotmail.fr (L.P.); withoutconcept@gmail.com (I.B.)

[2] Aix Marseille University, CNRS, LPC UMR 7290, FR 3C FR 3512, Marseille 13000, France; E-Mail: karen.davranche@univ-amu.fr

[3] National Institute for Sport Expertise and Performance, Paris 75012, France; E-Mail: arnaud.hays@gmail.com

[4] Creps Sud-Est, Aix en Provence 13080, France

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: brisswalter@unice.fr; Tel.: +33-6-31-79-27-17; Fax: +33-4-92-29-65-49.

Received: 31 October 2014 / Accepted: 16 December 2014 / Published: 31 December 2014

Abstract: The aim of this study was to assess cognitive performance and heart rate variability (HRV) following the ingestion of either a multi-vitamin-mineral preparation supplemented with 300 mg guarana (Ac); a caffeine supplement (C) or a placebo supplement (Pl). Fifty-six subjects took part in a randomized, double-blind crossover design, consisting of three experimental sessions ran on a different day. Cognitive performance was assessed using a go/no-go task and a simple reaction time (SRT) task. HRV was assessed in the time domain (RMSSD) and in the frequency domain (HF) and cognitive tasks were performed before ingestion, 15 min after ingestion and then every 15 min over the course of 3 h. Responses were faster (without change in accuracy) when the go/no-go task was performed between 30 and 90 min after ingestion of Ac (4.6% ± 0.8%, $p < 0.05$). No effect was observed on SRT task. A significant decrease in HRV was observed during the first hour under C and Pl, whereas HRV remained stable under Ac. The results suggest that the ingestion of a multi-vitamin-mineral with added guarana improves decision-making performance and is accompanied by a stable autonomic nervous system regulation during the first hour.

Keywords: guarana; reaction time; decision-making; caffeine; heart rate variability

1. Introduction

Guarana (*Paullinia Cupana)* is a climbing plant of the maple family. It is a rain forest vine that was domesticated in the Amazon for its fruits, which are rich in caffeine. Despite its increasing usage as a dietary constituents by athletes to support training or improve performance, guarana's specific behavioral effects have received little attention until recently. Currently there has been a growing interest in the beneficial effects of guarana, which is supported by a number of experimental studies in humans and rodents. Guarana has been reported to delay physical and mental cancer-related fatigue [1,2], improve cognitive performance [3–7], have positive effects on mood [6,7] and facilitate weight loss [8]. Guarana administration in rats reduced total food intake, carcass fat content and decreased plasma lactate concentrations in trained rats [9]. Guarana's may also be used as an antibacterial agent and has antioxidant properties [10].

The psychoactive properties of a single dose of guarana extract (75 mg) have been initially observed by Kennedy and colleagues in healthy adults [5]. Authors reported improvements in memory performance (*i.e.*, long-term storage system or secondary memory) and in response speed (albeit accompanied with a decrease in accuracy, suggesting a speed-accuracy trade-off). Using different doses of guarana extract (*i.e.*, 37.5 mg, 75 mg, 150 mg and 300 mg), Haskell and colleagues [6] confirmed an improvement of cognitive performance and highlighted changes in mood. Interestingly, there is an increase in self-rated "alertness" following the highest dose of guarana and an increase in self-rated "contentment" following all doses.

The psychoactive properties of guarana have often been attributed to the high concentration of caffeine contained in its seeds. However, the results of these latest studies [5,6] show that psychoactive effects can be observed using a 75 mg dose of guarana, which contains a level of caffeine considered too low (9 mg) to produce positive effects. These findings suggest that cognitive performance changes induced by guarana cannot be solely attributable to guarana's caffeine content. Evidence suggests that other components, such as flavonoids [11] or other potentially psychoactive components, including saponins and tannins [12,13], may contribute to cognitive function changes under guarana. Scholey and Haskell [11] suggested that these psychoactive effects could be attributable to modulation of guarana's caffeine content by other guarana components or by direct effects of noncaffeine constituents contained in guarana. To date, the relative contribution of caffeine and guarana is unclear and deserves further investigations to disentangle their psychoactive effects. The first aim of this study was to compare the effects of a multi-vitamin-mineral preparation supplemented with 300 mg guarana on cognitive function with an equivalent pure caffeine dose over the course of 3 h.

The efficacy of guarana supplementation associated with vitamins/minerals in terms of cognitive performance has been investigated more recently. Scholey and colleagues [14] were the first to bring to evidence that a multivitamin-mineral preparation containing guarana improved cognitive performance in humans and reduced mental fatigue associated with sustained mental effort. Following the administration of a single dose of a vitamin/mineral/guarana food supplement, an improvement in

performance, both in terms of speed and accuracy, as well as an attenuation of subjective mental fatigue have been observed during a sustained cognitive task (*i.e.*, Rapid Visual Information Processing Task, (RVIP) (During the RVIP task, subjects are requested to detect target sequences of digits and respond as quickly as possible by pressing a key response.)) [3]. More recently, Scholey and colleagues [7] evaluated the neurocognitive effects of multivitamin supplementations with and without guarana. The authors examined the neural substrates of guarana-induced effects using an fMRI protocol during a RVIP task and an Inspection Time (IT) activation task (During the IT task, subjects are requested to discriminate the longest of two lines displayed for a variable duration.). Results showed that both multivitamin treatments increased activation in areas involved in cognitive tasks, but intriguingly the activation was greater in the multivitamin with guarana condition.

Despite similar behavioral effects, it is not clear if the mechanisms of action responsible for the psychoactive effect of guarana on cognitive performance are similar with those described for caffeine [3]. The effect of caffeine on cognition is well documented; it has been shown that, caffeine alters attention and modifies the neural activity in cortical areas involved in the perceptual analysis of relevant stimulus information, e.g., [15]. However, the central nervous system does not seem to develop a great tolerance to caffeine and psychoactive effects can be accompanied by potential side effects, such as anxiety or nervousness [16], generated palpitations and arrhythmia. Because guarana contains caffeine, some similar potential side effects including psycho-physiological disturbances should be considered. Interactions between neural states and cognitive performance are a traditional topic of psychological research. Classical concepts from motivational psychology relate cognitive improvement with neural activation changes [17]. Within this framework, recent researchers have studied this relationship through the analysis of the autonomic nervous systems' regulation assessed by heart rate variability (HRV) [18–20]. According to Porges' [21] model, it could be predicted an association between higher resting levels of cardiac vagal tone and improved cognitive capacity [20]. Since HRV changes could represent activation [18] as well as anxiety [22], it could reflect, following ingestion, either positive or negative effects of guarana on cognition. To date, the effects of guarana on autonomic function remains unknown; the second aim of this study was to investigate potential side effects of guarana on the autonomic nervous systems' regulation through the analysis of HRV over the course of 3 h.

2. Experimental Section

2.1. Participants

Fifty-six subjects (32 males and 24 females) volunteered to participate in the study after an Internet announcement of the research project on the university website. The mean age of the males was 27.7 years (range: 19–45 years, body mass (74.1 ± 5.7) kg, height (179 ± 3) cm) and of the females was 29.5 years (range: 18–42 years, body mass (65.6 ± 3.6) kg, height (166 ± 2) cm). All of the participants were caffeine consumers (range: 200–500 mg per day). Exclusion criteria comprised severe physical diseases, psychiatric disorders, chronic alcohol consumption, as well as the use of psychoactive drugs or medication affecting the cardiovascular system. The procedures followed were in accordance with the Declaration of Helsinki 1975, revised Hong Kong 1989. The local ethics committee (Ile-de-France VII,

Saint Germain en Laye, France) reviewed and approved the study before its initiation and all subjects gave their informed written consent before participation.

2.2. Procedure

This study used a randomized, double blind, experimental design. Subjects were required to report to the laboratory for testing on three separate sessions with at least 48 h between each. Each subject was his own control, thus this study included three paired treatments: a vitamin/mineral/guarana supplement (Ac, n = 56); a caffeine supplement (C, n = 56); and a placebo supplement (P, n = 56). The three conditions were prepared by an independent laboratory and presented to the subjects mixed with water in a standardized blind conditioning. The vitamin/mineral/guarana complex was a commercially available effervescent tablet, Isoxan Actiflash® (Menarini, NHS, Rungis, France). The constituents are shown in Table 1. Caffeine contains 100 mg of caffeine (Natrol®, Biovéa, Le Mans France), which corresponds to an equivalent dose to that contained in the vitamin/mineral/guarana tablet. All subjects were tested individually in a quiet room and the experimental session began after 15 min of rest. They were required to avoid any kind of exercise or consume any alcohol for 24 h prior to the experimental session. At the beginning of the session, subjects had to complete a self-administered questionnaire to assess overnight caffeine abstinence according to Hughes *et al.* [23] study. All assessments were done in the afternoon approximately at the same time (2–6 pm).

Cognitive tasks were performed before ingestion, 15 min after ingestion, and then every 15 min over the course of 3 h. Cognitive task duration was about 8 min. Before each cognitive task, an electrocardiogram (ECG) was recorded during 5 min using a Biopac 150 system (Biopac Systems Inc., Goleta, CA, USA). All measures before ingestion were used as a baseline value for each day.

Table 1. Contents of the vitamin/mineral tablets/guarana, Isoxan Actiflash® effervescent tablets.

Active	Units	Per Day	European RDA	
			Males	Females
Vitamin C	180 mg	180 mg	90 mg	75 mg
Vitamin B1	0.705 mg	0.705 mg	1.2 mg	1.1 mg
Vitamin B2	0.798 mg	0.798 mg	1.3 mg	1.1 mg
Vitamin B3	9005 mg	9005 mg	16 mg	14 mg
Vitamin B6	1003 mg	1003 mg	1.7 mg	1.5 mg
Zinc	7490 mg	7490 mg	11 mg	8 mg
Guaraná ES	300 mg	300 mg	NA	NA
Ginseng ES	100 mg	100 mg	NA	NA

RDA (Recommended Dietary Allowances) are provided for males and females age ranging from 19 years to 70 years (European Food Safety Authority, 2010).

2.3. Cognitive Performance

Cognitive performances were assessed using two different tasks: a go/no-go task and a simple reaction time (SRT) task.

2.3.1. Go/No-Go Task

Stimuli were presented in white on a black background. Stimuli consisted of an H or an S. Participants were instructed to press a button if the stimulus was an H, and not to respond if the stimulus was an S. Both stimuli were equiprobable. Stimuli remained on the screen until a response was made or until 1200 ms had elapsed. There was an interval of 400–600 ms before the start of the next trial.

2.3.2. Simple Reaction Time (SRT) Task

The SRT task was measured from impulses recorded on a handgrip while the subject was seated. The subject was instructed to hold the handgrip in his/her preferred hand and to place his/her thumb on a button. SRT was calculated as the time required by the subject to remove his/her thumb from the button. This device was connected to a microcomputer with a sampling frequency of 120 Hz. The luminous stimuli appeared in the center of a screen and were separated by a variable foreperiod varying from 3–5 s Mean SRT and standard deviation were calculated for 40 trials and SRT under 160 ms was considered as an error (anticipated responses).

2.4. Heart Rate Measure

During the ECG assessment periods, participants were instructed to sit relaxed with hands on thighs without speaking or moving, and to breathe regularly. Two active electrodes (Ag/AgCl) were placed at the right mid-clavicle and the lowest left rib. Respiration was monitored with the same Biopac system using a piezoelectric thoracic belt. The QRS-signal waveform (R-R signal) was sampled at the resolution of 1 ms. The R-R intervals (*i.e.*, the length of time between the R peaks of consecutive QRS complexes) were calculated and checked for artifacts. The root mean square difference of successive normal R-R intervals (RMSSD) was calculated for the 5 min of recorded data. A fixed linear resampling frequency of 1024 equally spaced points per 3 min period was used. Power density in the HF (0.15–0.50 Hz) band was calculated for every three-minute spectrum by integrating the spectral power density within the frequency band [18–20]. The Respiratory Rate (RR) measure enabled us to conduct analyses with RR controlled since the central frequency of the HF component has been shown to be highly correlated with strain gauge measures of respiration [24].

2.5. Statistics

Changes from baseline scores for all dependent variables were calculated in contrast with pre-dose performance. Each dependent variable was analyzed using a repeated measures analysis of variance (ANOVA), including conditions (vitamin/mineral/guarana, Ac; caffeine, C; and placebo, Pl) × time (8 periods over the course of 3 h). The effect size was calculated using eta squared(eta2) values. Follow-up analyses were conducted using simple effect tests using Tukey's procedure. For analyses involving time, if the sphericity assumption was violated, then Greenhouse-Geisser [25] conservative degrees-of-freedom adjustments were applied and critical p values were corrected [26]. The data was analyzed using the Statistica 7.1 program (StatSoft, Maisons-Alfort, France)

3. Results

3.1. Cognitive Performance

Cognitive performance values at baseline and among times are represented in Table 2. No significant difference was found between male and female responses in this study therefore data is presented for the whole population.

Table 2. Descriptive statistics for cognitive performance and Heart Rate variability as a function of experimental condition (vitamin/mineral/guarana, Ac; caffeine, C; and placebo, Pl) at baseline and every 15 min over the course of 3 h.

Go/No-Go	Condition		Time (min)								
			0	**15**	**30**	**45**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**
reaction time (ms)	Ac	mean	329	329	317 *	314 *,§	315 *,§	325 *,§	345	347 *	349 *
		SD	16	13	24	18	25	19	14	17	20
	Pl	mean	330	331	334	339	345	352 ‡	359 ‡	358 ‡	358 ‡
		SD	18	25	32	46	33	25	26	21	13
	C	mean	327	329	329	333	335	340	350 †	355 †	356 †
		SD	17	19	28	32	29	22	20	19	16
Go/no-go errors (%)	Ac	mean	1	0.6	0.8	0.7	1.3	0.5	0.7	1.2	0.5
		SD	0.7	0.7	0.4	1.5	0.3	0.6	0.4	0.8	0.8
	Pl	mean	1	0.6	0.0	0.9	0.6	0.5	0.4	0.8	0.6
		SD	0.5	0.0	1.0	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5
	C	mean	0	0.6	0.4	0.8	0.9	0.5	1.3	1.0	0.6
		SD	0.6	0.3	0.7	0.9	0.3	0.5	0.4	0.5	0.7
Simple reaction time (ms)	Ac	mean	230	224	227	256 *	247 *	251 *	250 *	242 *	246 *
		SD	11	9	17	13	18	13	10	12	14
	Pl	mean	228	233	242	264 ‡	253 ‡	259 ‡	249 ‡	245 ‡	253 ‡
		SD	12	18	22	32	23	17	18	15	9
	C	mean	227	227	233	258 †	248 †	253 †	248 †	242 †	248 †
		SD	12	13	19	22	20	15	14	13	12
RMSSD (ms)	Ac	mean	64.1	66.6	63.3	63.6 §	60.6 *,§	60.7 *,§	57.3 *	56.2 *	54.5 *
		SD	8.9	10.5	12.7	4.3	4.1	5.8	5.7	7.4	7.8
	Pl	mean	67.0	66.2	61.4 ‡	59.8 ‡	56.5 ‡	54.8 ‡	54.1 ‡	53.3 ‡	54.6 ‡
		SD	10.2	11.6	15.5	8.3	2.4	4.5	2.2	3.8	11.2
	C	mean	65.2	66.0	64.3	61.4 †	58.2 †	57.4 †	55.4 †	54.5 †	54.3 †
		SD	9.5	11.0	14.0	6.3	3.3	5.1	8.9	5.6	9.4
HF (n.u.)	Ac	mean	41.1	40.7	40.6	39.7 §	38.7 *,§	36.9 *	35.5 *	36.3 *	35.6 *
		SD	2.8	4.5	5.8	8.1	5.9	8.4	2.1	5.6	3.7
	Pl	mean	41.6	40.5	36.6 ‡	35.6 ‡	35.5 ‡	35.4 ‡	35.8 ‡	36.1 ‡	35.8 ‡
		SD	9.8	3.2	3.7	6.3	3.2	3.6	5.1	4.1	4.8
	C	mean	41.4	40.5	39.9	37.5 †	36.6 †	36.0 †	35.9 †	36.5 †	36.0 †
		SD	6.2	3.8	4.7	7.1	4.5	6.0	3.6	3.9	5.1

* When a difference was significant with baseline for Ac condition; † when a difference was significant with baseline for C condition; ‡ when a difference was significant with baseline for Pl condition; § when a difference was significant between Ac and C condition.

3.1.1. Go/No-Go Task

There was a significant main effect of time ($p < 0.05$; eta2 = 0.42) and a significant interaction between time and condition ($p < 0.01$; eta2 = 0.63) on mean reaction time (RT) during the go/no-go task (Figure 1). For Ac, faster RT was observed from the 30th minute to the 90th minute with a significant difference between Ac and C conditions (maximal difference between C and Ac at the 60th minute: 8.5% ± 0.7%, $p < 0.05$) (Figure 1). In all conditions a significant decrease in performance was observed at the end of the experiment (respectively, for Pl, C and Ac conditions: −8.1% ± 2.6% *vs.* −8.2% ± 1.9% *vs.* −5.9% ± 1.7%). This impairment became significant at the 90 min for Pl condition (−6.3% ± 1.8%, $p < 0.05$)) and at the 120th minute for C condition (−6.5% ± 2.2%, $p < 0.05$), whereas it occurred only at the 150th minute for Ac condition (−5.4% ± 1.1%, $p < 0.05$). No significant effect was found on errors.

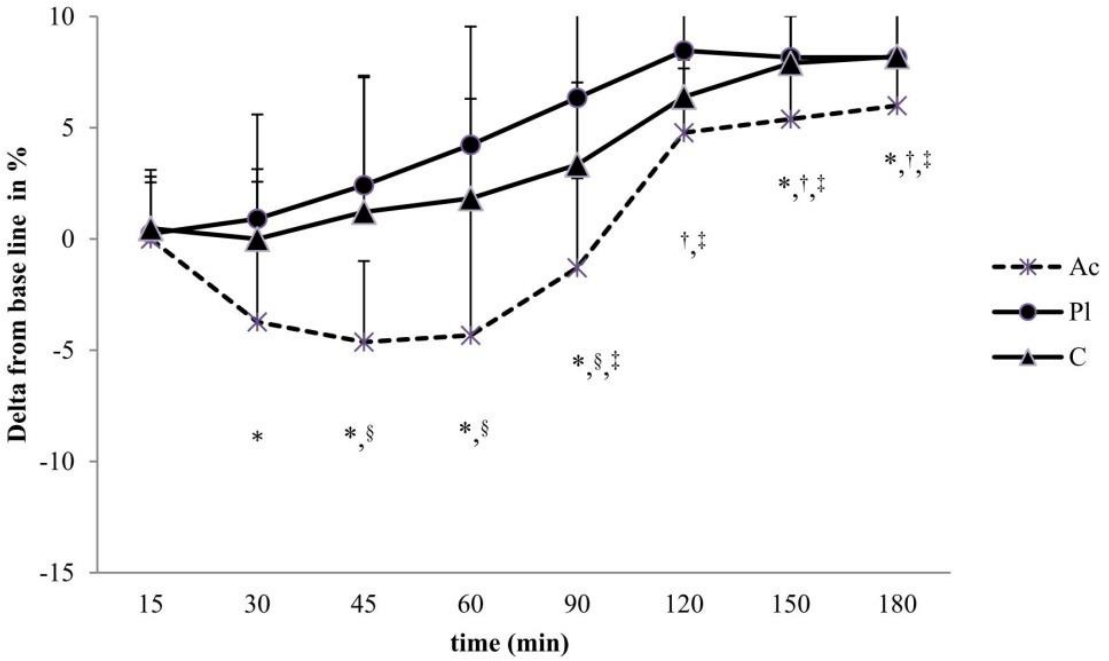

Figure 1. Change in reaction time performance (in percentage from baseline values) during the go/no-go task performed under vitamin/mineral/guarana (Ac), caffeine (C) and placebo (Pl) supplementation over the course of 3 h. * When a difference was significant with baseline for Ac condition; † when a difference was significant with baseline for C condition; ‡ when a difference was significant with baseline for Pl condition; § when a difference was significant between Ac and C condition.

3.1.2. Simple Reaction Time (SRT) Task

A significant effect of the time spent on the task was observed on mean RT ($p < 0.001$ eta2 = 0.58) and no interaction was observed between time and condition. Reaction time lengthens with time on task in all conditions after 45th minute (respectively, for Ac, C and Pl at 45th minute: 11.45% ± 1.8% *vs.* 13.6% ± 2.5% *vs.* 15.8% ± 2.1%, $p < 0.05$). No further significant changes were observed. No significant effect of time or condition was observed on anticipated responses.

3.2. Heart Rate Variability (HRV)

Heart Rate variability values at baseline and among times are represented in Table 2. A significant interaction was observed between time and condition on both RMSSD and HF values (respectively, $p = 0.01$, eta2 = 0.68 and $p = 0.01$, eta2 = 0.63). In all conditions, a decrease in RMSSD was observed at the end of the experiment (respectively, for Pl, C and Ac conditions: −18.5% ± 3.8%; −16.8% ± 2.9% and −15.9% ± 2.9%). When compared with baseline, RMSSD values decreased at the 30th minute for Pl (−8.3% ± 2.4%, $p < 0.05$) and at the 45th minute for C (−5.9% ± 1.1%, $p < 0.05$), whereas it remained stable for Ac until the 60th minute (−5.1% ± 2.8%, ns). Furthermore, RMSSD values were significantly lower for C than for Ac between the 45th and the 90th minute (the maximal difference was observed at the 45th minute: 5.3% ± 0.5%, $p < 0.05$). A similar decrease was observed for HF values. After the 30th minute, the decline was maximal for both Pl (−12.2% ± 2.1%, $p < 0.05$) and C (−9.6% ± 1.8%, $p < 0.05$) and occurred later, at the 60th minute, for Ac condition (−5.8% ± 1.4%, $p < 0.05$). A significant difference was observed between C and Ac conditions between the 45th and the 60th minute (mean difference between C and Ac, respectively, at the 45th and the 60th minute: 6.1% ± 1.1% and 6.3% ± 0.9%, $p < 0.05$) (Figure 2).

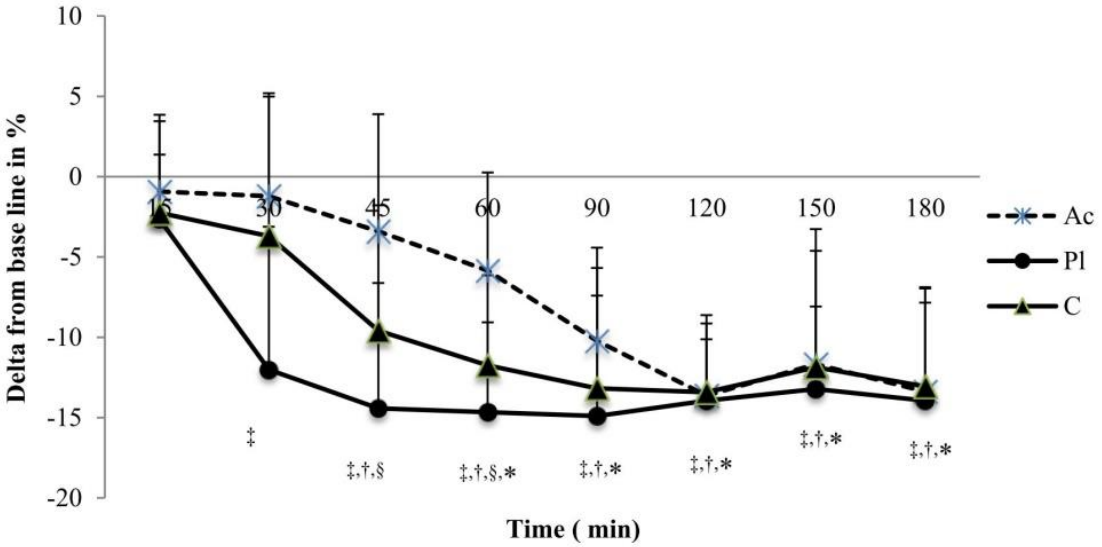

Figure 2. Graphic representation of change from baseline scores (in %) in the High Frequency (HF) band over the course of 3 h. * When a difference was significant with baseline for Ac condition; † when a difference was significant with baseline for C condition; ‡ when a difference was significant with baseline for Pl condition; § when a difference was significant between Ac and C condition.

4. Discussion

This study examined cognitive performance and autonomic function following the ingestion of either, a vitamin complex with guarana, a caffeine dose alone at the same concentration than in guarana, and placebo. The main findings of the study were that (1) decisional cognitive performance was significantly improved from 30 min to 90 min after the ingestion of the complex with guarana and this change differed

from that observed after a single dose of caffeine; (2) after ingestion of the complex with guarana, stability in parasympathetic modulation was observed during the first hour of the experiment, whereas a decrease was observed for placebo and caffeine conditions; (3) In contrast with previous studies examining the effect of caffeine ingestion on cognition, no effect was observed on SRT.

The improvement in decisional cognitive performance observed during the go/no-go task following guarana ingestion is in agreement with previous results reported in studies comparing guarana and placebo ingestion [3–7]. Indeed, Kennedy *et al.* [5] have observed that the ingestion of 75 mg of guarana in healthy subjects leads to an improvement in memory performance. Thereafter, Haskell *et al.* [6] compared four different doses (37.5 mg, 75 mg, 150 mg and 300 mg) of a standardized guarana extract. Results indicated that the two lower doses produced greater beneficial effects on memory performance than the higher doses. One interesting result of this study is that 75 mg of guarana contains a level of caffeine (9 mg) that is generally considered too low to affect cognitive performance. The authors proposed that the positive effect of guarana is not only related to caffeine. Furthermore, Campos *et al.* [27] have compared guarana (25 and 50 mg/kg) and caffeine (10 and 20 mg/kg) effects on mouse behavior. These authors reported that both guarana and caffeine have a significant effect on behavior, but suggested that the mechanisms underlying antidepressant-like activity are different. The fact that our results indicate a differentiated effect between guarana and caffeine ingestion supports this hypothesis. In our study the improvement in cognitive performance during the go/no-go task is only observed following guarana ingestion. Guarana contains 4% to 8% caffeine, as well as other alkaloids, such as theophylline (500–750 ppm) and theobromine (300–500 ppm), tannins or saponins. We assume that the difference between the complex ingestion and caffeine could be related to the presence of other psychoactive substances including tannins and saponins that are known to influence cognitive performance [13]. Vitamins present in the complex could also have a positive effect on cognitive performance. In elderly people with neurological diseases several minerals and vitamins have been classically described to positively affect cognitive performance. For example, a significant effect has been observed in elderly people of vitamin B, e.g., [28], or vitamins C and E on cognition, e.g. [29]. In a recent review, Huskisson *et al.* [30] indicated that vitamins B and C also present in the complex used in our study seem most effective, however, these authors also suggested that the results in this area need to be validated in healthy subjects.

In our study no effect of the ingestion of a complex with guarana or caffeine alone has been observed on SRT. This result is different from those reported in previous works showing a significant improvement in TRS after ingestion of caffeine without increasing the number of anticipated responses [31,32]. However, in all studies doses of caffeine were greater than those used in this study and positive effects were observed for a dose of caffeine of 200 or 250 mg, respectively, in studies conducted by Lieberman, *et al.* [32] and Attwood *et al.* [31]. Therefore, the dose of caffeine in the complex with guarana seems too low to induce an improvement in performance during perceptual-motor tasks involving low uncertainty, such as SRT.

In this study after either complex with guarana, stability in parasympathetic modulation (RMSSD or HF) was observed during the first hour after ingestion, whereas a decrease was observed for placebo and caffeine alone. Furthermore these effects are concomitant with changes in decision-making performance.

Heart rate variability is a noninvasive measure of autonomic contributions to cardiac functioning. The time domain (RMSSD) and the frequency domain (HF) reflect the parasympathetic modulation of the

autonomic system even if they are not always strongly correlated [18]. Therefore a decrease in RMSSD and/or HF indicates a more sympathetic-and less parasympathetic-related modulation. Within this framework previous works have drawn links between HRV decrease and anxiety or worry [22,33]. Therefore the stability in parasympathetic modulation observed in our study indirectly suggests that ingestion of guarana complex does not lead to an increase in anxiety in our healthy subjects immediately after the ingestion.

Many investigations from cognitive psycho-physiologists have previously studied the relationship between HRV and cognitive performance, but results remain contradictory according to the nature of the cognitive task and there are still many questions regarding the relationship between acute changes in HRV and cognitive performance, e.g., [18]. On the one hand, results recorded during task engagement suggest that a pattern of cardiovascular adjustments, including enhanced sympathetic and reduced vagal cardiovascular influences, may induce an adaptive state associated with improved cognitive functioning and faster RT [19,34]. On the other hand, when HRV is assessed independent of task engagement, like in our study, a decrease in HRV is associated with worse cognitive performance [35]. Recent models from the literature suggest a link between HRV and prefrontal cortical activity involved in executive functions, such as decision-making. For example, the Neurovisceral Integration Model proposes that all these processes of cognitive, affective and physiological regulation may be related for goal-directed behavior [36]. Within this framework, low HRV values or a decrease in HRV could be viewed as reflecting anxiety and worry, but it could also reflect mental load [37,38] and inefficient or ineffective cognitive function [21,37]. The existing literature tends to yield supportive evidence, indicating that HRV is positively associated with performance during response inhibition and working memory tasks [20,35,39,40]. Thus, in our study the decrease in HRV in Pl and C conditions during the first hour of the experiment could be related to an impairment in cognitive performance and an increase in mental load [36], whereas the stability in HRV in Ac during more than one hour seems to indicate the efficacy of such ingestion to maintain parasympathetic modulation and cognitive performance during cognitive tasks requiring executive processes.

5. Conclusions

This research supports previous findings concerning the psychoactive properties of guarana and provides evidence that a multi-vitamin–mineral ingestion with added guarana improves decision-making performance without any additional impairment of the autonomic nervous systems' regulation or side effects on anxiety.

Acknowledgments

The authors would like to thank Laura Gray for English revisions. This study was sponsored by Menarini NHS (Nutrition-Hygiène-Santé) Medical Research Unit, Rungis, France. No funds were received for covering the costs to publish in open access.

Author Contributions

Jeanick Brisswalter and Karen Davranche conceived and designed the experiments; Laura Pomportes, Ioanna Brisswalter and Arnaud Hays performed the experiments; Laura Pomportes and Jeanick Brisswalter analyzed the data; Jeanick Brisswalter, Laura Pomportes and Karen Davranche wrote the paper.

Conflicts of Interests

The Authors declares no conflict of interest.

References

1. De Oliveira Campos, M.P.; Riechelmann, R.; Martins, L.C.; Hassan, B.J.; Casa, F.B.; del Giglio, A. Guaraná (*Paullinia cupana*) improves fatigue in breast cancer patients undergoing systemic chemotherapy. *J. Altern. Complement. Med.* **2011**, *17*, 505–512.
2. Campos, M.P.; Hassan, B.J.; Riechelmann, R.; del Giglio, A. Cancer-related fatigue: A review. *Rev. Assoc. Med. Bras.* **2011**, *57*, 211–219.
3. Kennedy, D.O.; Haskell, C.F.; Robertson, B.; Reay, J.; Brewster-Maund, C.; Luedemann, J.; Maggini, S.; Ruf, M.; Zangara, A.; Scholey, A.B. Improved cognitive performance and mental fatigue following a multi-vitamin and mineral supplement with added Guaraná (*Paullinia cupana*). *Appetite* **2008**, *50*, 506–513.
4. Galduroz, J.C.; Carlini, E.A. The effects of long-term administration of Guaraná on the cognition of normal, elderly volunteers. *Sao Paulo Med. J.* **1996**, *114*, 1073–1078.
5. Kennedy, D.O.; Haskell, C.F.; Wesnes, K.A.; Scholey, A.B. Improved cognitive performance in human volunteers following administration of Guaraná (*Paullinia cupana*) extract: Comparison and interaction with Panax ginseng. *Pharmacol. Biochem. Behav.* **2004**, *79*, 401–411.
6. Haskell, C.F.; Kennedy, D.O.; Wesnes, K.A.; Milne, A.L.; Scholey, A.B. A double-blind, placebo-controlled, multi-dose evaluation of the acute behavioural effects of Guaraná in humans. *J. Psychopharmacol.* **2007**, *21*, 65–70.
7. Scholey, A.; Bauer, I.; Neale, C.; Savage, K.; Camfield, D.; White, D.; Maggini, S.; Pipingas, A.; Stough, C.; Hughes, M. Acute effects of different multivitamin mineral preparations with and without Guaraná on mood, cognitive performance and functional brain activation. *Nutrients* **2013**, *5*, 3589–3604.
8. Opala, T.; Rzymski, P.; Pischel, I.; Wilczak, M.; Wozniak, J. Efficacy of 12 weeks supplementation of a botanical extract-based weight loss formula on body weight, body composition and blood chemistry in healthy, overweight subjects—A randomised double-blind placebo-controlled clinical trial. *Eur. J. Med. Res.* **2006**, *11*, 343–350.
9. Lima, W.P.; Carnevali, L.C.; Eder, R., Jr.; Costa Rosa, L.F.; Bacchi, E.M.; Seelaender, M.C. Lipid metabolism in trained rats: Effect of guarana (*Paullinia cupana* Mart.) supplementation. *Clin. Nutr.* **2005**, *24*, 1019–1028.

10. Yamaguti-Sasaki, E.; Ito, L.A.; Canteli, V.C.; Ushirobira, T.M.; Ueda-Nakamura, T.; Dias Filho, B.P.; Nakamura, C.V.; de Mello, J.C. Antioxidant capacity and *in vitro* prevention of dental plaque formation by extracts and condensed tannins of *Paullinia cupana*. *Molecules* **2007**, *12*, 1950–1963.
11. Scholey, A.; Haskell, C. Neurocognitive effects of guaraná plant extract. *Drugs Fut.* **2008**, *33*, doi:10.1358/dof.2008.33.10.1250977.
12. Espinola, E.B.; Dias, R.F.; Mattei, R.; Carlini, E.A. Pharmacological activity of Guarana (*Paullinia cupana* Mart.) in laboratory animals. *J. Ethnopharmacol.* **1997**, *55*, 223–229.
13. Mattei, R.; Dias, R.F.; Espínola, E.B.; Carlini, E.A.; Barros, S.B. Guarana (*Paullinia cupana*): Toxic behavioral effects in laboratory animals and antioxidants activity *in vitro*. *J. Ethnopharmacol.* **1998**, *60*, 111–116.
14. Scholey, A.B.; Kennedy, D.O.; Zangara, A.; Robertson, B.C.; Reay, J.; Luedemann, J.; Maggini, S.; Ruf, M. A multivitamin–mineral preparation with guaraná positively effects cognitive performance and reduces mental fatigue during sustained mental demand. *Appetite* **2008**, *50*, doi:10.1016/j.appet.2007.09.055
15. Mednick, S.C.; Cai, D.J.; Kanady, J.; Drummond, S.P. Comparing the benefits of caffeine, naps and placebo on verbal, motor and perceptual memory. *Behav. Brain Res.* **2008**, *193*, 79–86.
16. Clauson, K.A.; Shields, K.M.; McQueen, C.E.; Persad, N. Safety issues associated with commercially available energy drinks. *J. Am. Pharm. Assoc. (2003)* **2008**, *48*, 55–67.
17. Brisswalter, J.; Collardeau, M.; Rene, A. Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Med.* **2002**, *32*, 555–566.
18. Luft, C.D.; Takase, E.; Darby, D. Heart rate variability and cognitive function: Effects of physical effort. *Biol. Psychol.* **2009**, *82*, 164–168.
19. Duschek, S.; Muckenthaler, M.; Werner, N.; del Paso, G.A. Relationships between features of autonomic cardiovascular control and cognitive performance. *Biol. Psychol.* **2009**, *81*, 110–117.
20. Hansen, A.L.; Johnsen, B.H.; Thayer, J.F. Vagal influence on working memory and attention. *Int. J. Psychophysiol.* **2003**, *48*, 263–274.
21. Porges, S.W. Vagal tone: A physiologic marker of stress vulnerability. *Pediatrics* **1992**, *90*, 498–504.
22. Miu, A.C.; Heilman, R.M.; Miclea, M. Reduced heart rate variability and vagal tone in anxiety: Trait *versus* state, and the effects of autogenic training. *Auton. Neurosci.* **2009**, *145*, 99–103.
23. Hughes, J.R.; Higgins, S.T.; Bickel, W.K.; Hunt, W.K.; Fenwick, J.W.; Gulliver, S.B.; Mireault, G.C. Caffeine self-administration, withdrawal, and adverse effects among coffee drinkers. *Arch. Gen. Psychiatry* **1991**, *48*, 611–617.
24. Thayer, J.F.; Sollers, J.J.; Ruiz-Padial, E.; Vila, J. Estimating respiratory frequency from autoregressive spectral analysis of heart period. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* **2002**, *21*, 41–45.
25. Greenhouse, S.W.; Geisser, S. On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika* **1959**, *24*, 95–112.
26. Winer, B.J.; Brown, D.R.; Michels, K.M. *Statistical Principles in Experimental Design*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1991.

27. Campos, A.R.; Barros, A.I.; Albuquerque, F.A.; Leal, L.K.A.M.; Rao, V.S. Acute effects of Guaraná (*Paullinia cupana* Mart.) on mouse behaviour in forced swimming and open field tests. *Phytother. Res.* **2005**, *19*, 441–443.
28. Durga, J.; van Boxtel, M.P.; Schouten, E.G.; Bots, M.L.; Kok, F.J.; Verhoef, P. Folate and the methylenetetrahydrofolate reductase 677C→T mutation correlate with cognitive performance. *Neurobiol. Aging* **2006**, *27*, 334–343.
29. Balk, E.M.; Raman, G.; Tatsioni, A.; Chung, M.; Lau, J.; Rosenberg, I.H. Vitamin B6, B12, and folic acid supplementation and cognitive function: A systematic review of randomized trials. *Arch. Intern. Med.* **2007**, *167*, 21–30.
30. Huskisson, E.; Maggini, S.; Ruf, M. The influence of micronutrients on cognitive function and performance. *J. Int. Med. Res.* **2007**, *35*, 1–19.
31. Attwood, A.; Terry, P.; Higgs, S. Conditioned effects of caffeine on performance in humans. *Physiol. Behav.* **2010**, *99*, 286–293.
32. Lieberman, H.R.; Tharion, W.J.; Shukitt-Hale, B.; Speckman, K.L.; Tulley, R. Effects of caffeine, sleep loss, and stress on cognitive performance and mood during U.S. Navy SEAL training. *Psychopharmacology* **2002**, *164*, 250–261.
33. Friedman, B.H. An autonomic flexibility-neurovisceral integration model of anxiety and cardiac vagal tone. *Biol. Psychol.* **2007**, *74*, 185–199.
34. Hansen, A.L.; Johnsen, B.H.; Sollers, J.J.; Stenvik, K.; Thayer, J.F. Heart rate variability and its relation to prefrontal cognitive function: The effects of training and detraining. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2004**, *93*, 263–272.
35. Elliot, A.J.; Payen, V.; Brisswalter, J.; Cury, F.; Thayer, J.F. A subtle threat cue, heart rate variability, and cognitive performance. *Psychophysiology* **2011**, *48*, 1340–1345.
36. Thayer, J.F.; Lane, R.D. A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *J. Affect. Disord.* **2000**, *61*, 201–216.
37. Jorna, P.G. Spectral analysis of heart rate and psychological state: A review of its validity as a workload index. *Biol. Psychol.* **1992**, *34*, 237–257.
38. Tattersall, A.J.; Hockey, G.R. Level of operator control and changes in heart rate variability during simulated flight maintenance. *Hum. Factors* **1995**, *37*, 682–698.
39. Croizet, J.C.; Despres, G.; Gauzins, M.E.; Huguet, P.; Leyens, J.P.; Meot, A. Stereotype threat undermines intellectual performance by triggering a disruptive mental load. *Pers. Soc. Psychol. Bull.* **2004**, *30*, 721–731.
40. Hansen, A.L.; Johnsen, B.H.; Thayer, J.F. Relationship between heart rate variability and cognitive function during threat of shock. *Anxiety Stress Coping* **2009**, *22*, 77–89.

© 2014 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Etude n°2 : Effet d'un complexe créatine-guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance

Etude n°3 : Effet de l'ingestion d'hydrates de carbone sur la puissance maximale et la performance cognitive

L'objectif de ces études était d'évaluer l'effet de l'ingestion de deux suppléments nutritionnels qui sont consommés par les sportifs dans les disciplines à répétitions de sprints, à savoir les CHO ainsi qu'un complexe composé de guarana et de créatine, sur des indices de performance physique et cognitive.

Dix-sept athlètes de haut niveau (7 femmes, 10 hommes) en Squash (n = 8) et en Escrime (n = 9) ont réalisé trois sessions expérimentales. Les sujets devaient ingérer en simple aveugle 500 ml de CHO (fructose, maltodextrine, 7%), d'un complexe de guarana-créatine (1500 mg de guarana + 1000 mg de créatine, CRE+G) ou d'un placebo (Pl). L'ingestion était réalisée en deux prises équivalentes, 60 minutes et 30 minutes avant le début de l'exercice. L'exercice consistait à réaliser 6 sprints de 5 secondes sur ergocycle, séparés de 25 secondes de récupération passive. Les indices de performances mesurés étaient la puissance maximale produite (pic de puissance) pour chaque sprint, ainsi que le pourcentage de fatigue calculé par la différence de pic de puissance entre le meilleur des 6 sprints et le dernier sprint réalisé. La performance cognitive était mesurée lors de 4 tâches cognitives, avant l'exercice/après ingestion, ainsi qu'après l'exercice de sprint/après ingestion. Les conditions de passation après l'exercice de sprint différaient entre les tâches. Les tâches de TRS et de motilité oculaire étaient réalisées au repos dès la fin de l'exercice

de sprint, tandis que les tâches de balayage visuel et de Go/Nogo étaient réalisées après l'exercice de sprint mais simultanément à un exercice de pédalage sur ergocycle fixé à une intensité de 80% de la FC_{max} pour les escrimeurs et 85% FC_{max} pour les athlètes en Squash.

L'ensemble des tâches réalisées au cours de ce protocole repose sur le paradigme de la chronométrie mentale, où il est demandé aux sujets de répondre le plus vite possible, tout en réalisant le moins d'erreur. Le balayage visuel est une fonction de la perception visuelle dirigée par l'attention qui nous permet de détecter et de reconnaître les stimuli visuels. Cette fonction est utilisée lorsque nous voulons détecter un stimulus précis dans notre environnement. La tâche de motilité oculaire mesure la capacité à modifier la position des yeux pour porter le regard vers les informations importantes de l'environnement. Dans cette épreuve, la latence des saccades oculaires est plus particulièrement investiguée.

Les résultats de la performance de sprint suggèrent que l'ingestion du complexe CRE+G entraîne un effet bénéfique de faible magnitude sur la moyenne des pics de puissance (+2,5%, TE =0,12), ainsi qu'une diminution de forte magnitude de la fatigue (-3%, TE = 0,73) comparés au Pl. L'ingestion de CHO traitée en analyse qualitative (Hopkins et al. 2009) suggère un effet bénéfique *très probable* sur la moyenne les pics de puissance (99%) et *probable* sur la fatigue (77%).

Nos résultats indiquent que l'ingestion de CHO diminue significativement le TR lors tâche de TRS après l'exercice comparée à la condition Pl (+8%, Δ= 17 ms). Aucun effet de l'ingestion du complexe CRE+G n'est indiqué.

Concernant la tâche de Go/Nogo, il est suggéré que l'ingestion de CHO a un effet bénéfique *probable* sur la vitesse de traitement de l'information après l'exercice

comparée à la condition Pl (82%). Par ailleurs, la condition de CRE+G améliore significativement la vitesse de traitement de l'information de +6% comparée à la condition Pl (Δ = 29 ms).

Pour la motilité oculaire, un effet favorable de l'ingestion de CRE+G est indiqué sur le TR avant l'exercice de sprint comparée à la condition Pl (+5%, Δ = 26 ms), tandis qu'un changement de stratégie est indiqué après l'exercice de sprint. Aucun effet de l'ingestion de CHO n'est indiqué.

Enfin les résultats indiquent que seule l'ingestion de CRE+G entraîne une amélioration significative du TR de balayage visuel après l'exercice de sprint, comparée au Pl de +12% (Δ = 209 ms).

Pomportes, L., Davranche, K., Hays, A., Brisswalter, J. Effet d'un complexe creatine-guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. *Science & Sports*. 2015 doi: 10.1016/j.scispo.2015.04.002.

Pomportes, L., Brisswalter, J., Hays, A.,Davranche, K. Effect of carbohydrate intake on maximal power output and cognitive performances. *Sports*. 2016, 4, 49 ; doi :10.3390/sports4040040.

Science & Sports (2015) xxx, xxx–xxx

ELSEVIER MASSON

Disponible en ligne sur
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com

ARTICLE ORIGINAL

Effet d'un complexe créatine–guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance

Effect of a creatine–guaranà complex on muscular power and cognitive performance in high-level athletes

L. Pomportes[a,b], K. Davranche[c], A. Hays[b], J. Brisswalter[a,*]

[a] *Laboratoire motricité humaine éducation sport santé, université de Nice Sophia-Antipolis, 261, route de Grenoble, 06205 Nice cedex 3, France*
[b] *CREPS PACA, 62, chemin du Viaduc, 13080 Aix-en-Provence, France*
[c] *Laboratoire de psychologie cognitive (LPC), UMR 7290, Aix-Marseille université, 58, boulevard Charles-Livon, 13284 Marseille, France*

Reçu le 1er mars 2015 ; accepté le 15 avril 2015

MOTS CLÉS
Créatine ;
Guarana ;
Cognition ;
Performance musculaire

Résumé
Objectifs. — L'objectif de cette étude était de comparer les effets de la prise d'un complément à base de créatine et de guarana (CRE + G) ou d'un placebo (Pl) sur les indices de puissance musculaire et de performance cognitive chez des sportifs très entraînés.
Sujets et méthodes. — Dix-sept athlètes de haut niveau en squash et escrime ont participé à 2 sessions expérimentales présentées de façon randomisée séparées d'une semaine et correspondant à la prise d'un complément nutritionnel à base de créatine (1000 mg) et guarana (1500 mg) (CRE + G) ou d'un placebo (Pl). La puissance musculaire a été évaluée lors d'un test de 6 sprints de 6 secondes avec 25 secondes de récupération réalisés sur ergocycle. La performance cognitive a été mesurée avant, et après le test de sprint par des tâches de mesure de temps de réaction simple, de vigilance, de motilité oculaire et des tâches décisionnelles (Go/No-Go). La supplémentation était présentée à l'athlète en deux prises, espacées de 30 minutes, 60 et 30 minutes avant le début de l'effort.
Résultats. — Les résultats indiquent un effet positif du complément créatine + guarana sur la puissance musculaire (fatigue et pic de puissance) ainsi que sur la performance cognitive mesurée post-exercice pour les tâches de vigilance, de Go/No-Go et de motilité oculaire. Aucun effet n'est observé sur les tâches de temps de réaction simple.

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : brisswalter@unice.fr (J. Brisswalter).

http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002
0765-1597/© 2015 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine–guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

Conclusion. — Le complément créatine + guarana semble présenter un effet bénéfique sur la puissance musculaire et sur la performance cognitive décisionnelle. À ce titre, ce supplément peut présenter un intérêt pour améliorer la performance sportive dans des disciplines avec une forte sollicitation des processus cognitifs pendant l'effort.
© 2015 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

KEYWORDS
Creatine;
Guaranà;
Cognition;
Physical performance

Summary
Background. — The aim of this study was to compare the effects of the ingestion of either a creatine + guaranà (CRE + G) supplement or a placebo (Pl) on muscle power and cognitive performance.
Methods. — Seventeen high-level athletes specialized in squash and fencing took part in 2 randomized experimental sessions corresponding to the ingestion of a complex composed by creatine (1000 mg) + guaranà (1500 mg) and a placebo. The muscle power was assessed by a test of six maximal sprints on ergocycle sprints: 6 seconds long intercepted by 25 seconds of resting. Cognitive performance was assessed before and after the sprint test using a simple reaction time task, alertness task, ocular motility task and a Go/No-Go task. Supplement was ingested in a two doses, spaced from 30 minutes, 60 and 30 minutes before exercise.
Results. — Results indicate a positive effect of creatine + guaranà supplement on the muscle power (peak power and fatigue) on and cognitive performance recorded post exercise for alertness Go/No-Go and ocular motricity tasks. No effect was observed on simple reaction time.
Conclusion. — Creatine + guaranà supplement seems to have a beneficial effect on muscle power and decisional cognitive performance. This result suggests that creatine + guaranà ingestion could have an interest to enhance performance in sports with high cognitive constraints.
© 2015 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

La performance dans les activités physiques et sportives dépend à la fois de la capacité à produire un effort important mais aussi à la maintenir et/ou le réitérer et cela malgré l'apparition de phénomènes de fatigue. Lors de l'exercice modéré, il est communément observé une relation différente entre le niveau de sollicitation physiologique et la performance cognitive en fonction de la nature de la tâche cognitive [1]. Dans le cas d'exercice modéré de courte durée (< à 1 h), les performances dans les tâches cognitives décisionnelles se trouvent améliorées pour une intensité modérée ou forte tandis que celles des tâches cognitives perceptuelles sont parfois altérées et ceci quelque soit l'intensité de l'exercice [2,3]. L'effet d'amélioration de la performance cognitive à l'exercice peut être expliquée par l'augmentation du flux cérébral [4] mais aussi par la modification de certains neurotransmetteurs tels que les catécholamines [2,5]. Chmura et al. (1998) [6] ont proposé d'utiliser le concept du seuil d'adrénaline pour expliquer une amélioration de la performance décisionnelle : un haut niveau d'adrénaline sanguin est associé à un changement du système nerveux central qui peut augmenter la performance cognitive.

Dans ce cadre, des travaux récents (pour revue voir, Meeusen, [7]) suggèrent que l'adoption d'une stratégie nutritionnelle particulière pourrait influencer le fonctionnement cognitif lors de l'exercice en modifiant l'état physiologique cérébral. Parmi les stratégies les plus étudiées, la prise de caféine qui est un neuro-stimulant, favorise la sécrétion de dopamine par inhibition de l'adénosine et améliore les niveaux de force, d'endurance, ou encore d'éveil [7,8]. En revanche, ses effets restent individuels avec parfois des effets secondaires importants (palpitations, arythmie, anxiété, nervosité...). De façon alternative, l'attention et la pratique des sportifs a récemment été portée sur la prise de guarana (Paullinia cupana) qui est une plante originaire de la forêt amazonienne utilisée depuis des milliers d'années comme stimulant par les tribus locales et que l'on retrouve depuis peu dans de nombreux compléments nutritionnels à destination des athlètes. Cette substance connue pour ses effets stimulants contient 5 % à 10 % de caféine mais aussi des tanins, saponines et d'autres alcaloïdes. Le guarana semble présenter au repos des effets positifs sur les tâches cognitives mais sans les effets négatifs associés à la prise de caféine [9]. En effet au repos, des études récentes ont montré que le guarana avait des effets significatifs sur des tâches de vitesse de mémorisation, les tâches décisionnelles et dans une moindre mesure sur l'altération de la vigilance avec le temps [9,10]. En revanche à notre connaissance aucune étude n'a étudié l'effet de la prise de guarana sur l'évolution de la performance cognitive lors de l'exercice ainsi que sur la performance musculaire.

Dans les pratiques de la population sportive, notamment à haut niveau de performance la prise de guarana est souvent associé à la créatine. Les effets de la créatine sur la performance physique sont mieux connus et il a été montré dans de nombreuses études que l'apport exogène de créatine peut augmenter la performance dans les exercices de haute intensité, notamment dans les exercices pour lesquels la phosphocréatine (PCr) est la principale source anaérobie

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

d'ATP (pour revue voir Tarnopolsky, 2010 [11]). Par ailleurs, quelques études ont également suggéré un effet positif de la créatine sur la performance cognitive [12,13].

Bien que la caféine et la créatine soient des aides communément utilisées dans la performance sportive, et notamment chez les sportifs de haut niveau de performance, aucun argument réel n'existe pour justifier leur usage simultané [11]. Aussi, l'objectif principal de ce travail est d'étudier les effets conjoints de prise de créatine et de guarana sur la performance physique et cognitive. Nous émettons l'hypothèse selon laquelle l'association créatine et guarana pourrait potentialiser les effets positif de l'exercice sur la performance cognitive lors de l'exercice comparativement à un placebo.

2. Matériel et méthodes

2.1. Participants

Dix-sept sportifs de haut niveau dont 9 en escrime et 8 en squash (moyenne ± écart-type : 18,2 ± 3,7 ans, 7 femmes et 10 hommes) ont participé à ce protocole. Les sujets sélectionnés ne présentaient pas de pathologie ou traitement pouvant influencer les résultats et aucun n'avait l'habitude de consommer des suppléments à base de guarana et/ou de créatine.

2.2. Protocole expérimental

Préalablement à la phase expérimentale, chaque sujet a été soumis à une phase d'apprentissage des tests physiques sur ergocycle WattBike® et des tests cognitifs sur ordinateur (logiciel TAP Tests d'évaluation de l'attention, version 2.3 ; P. Zimmermann et B. Fimm). Les critères d'apprentissage étaient l'atteinte par le sujet d'une variation inférieure ou égale à 10 % par rapport au passage précédent aussi bien dans les performances cognitives que sur les valeurs de pics de puissance obtenus lors du test sur ergocyle.

La phase expérimentale était composée de deux sessions réalisées lors de deux semaines consécutives, le même jour, à la même heure pour chaque sujet et dans la même configuration d'entraînement. Lors des deux sessions expérimentales, deux conditions nutritionnelles étaient présentées au sujets dans un ordre randomisé : une condition créatine + guarana ($n = 17$, groupe CRE + G), et une condition placebo ($n = 17$, groupe Pl). Le complément CRE + G, était un complément disponible dans le commerce pour les athlètes et se présentait sous la forme de pastilles effervescentes de créatine et d'une dose de 25 mL de guarana diluées dans un verre opaque de 500 mL Au final, le complexe CRE + G contenait 1500 mg de guarana, 1000 mg de créatine, 150 mg de taurine, 133 mg de caféine, 120 mg de L-glutamine, 106,7 mg de vitamine C, 100 mg de L-arginine et 1,1 mg de vitamine B1. Le placebo était également présenté dans le même contenant opaque et était constitué d'eau gazeuse aromatisée sans sucre ajouté.

Le déroulement de chaque session expérimentale débutait par la prise de 250 mL du complément suivi du remplissage d'un questionnaire sur « l'état de fatigue physique et psychologique » du moment. Après 30 minutes, les sujets ingéraient les 250 mL restants du complément suivis de la réalisation de l'ensemble des tests cognitifs (Alerte phasique : tâche de mesure du temps de réaction simple, Balayage visuel : tâche de mesure de la vigilance, Go/No-Go : tâche de mesure des capacités d'inhibitions décisionnelles, et tâche de Motilité oculaire) au calme dans un pièce isolée (durée totale des tests cognitifs : 25 minutes). Dès la fin des tests cognitifs, les sujets réalisaient les phases d'échauffement puis un test de répétition de sprints sur ergocycle Wattbike® (durée 20 minutes). Immédiatement à l'arrêt de ce test, les sujets réalisaient dans le même espace calme deux des quatre tests cognitifs : Alerte phasique et Motilité oculaire (durée totale 15 minutes). Enfin, les sujets terminaient la session par un exercice de pédalage sous-maximal correspondant à l'intensité moyenne de compétition (80 % fréquence cardiaque maximale en escrime et 85 % fréquence cardiaque maximale en squash). Pendant l'exercice, les sujets devaient réaliser les tests cognitifs des tâches de Balayage visuel et de Go/No-Go.

Les 4 tests cognitifs étaient donc réalisés 2 fois lors d'une session expérimentale : une fois intégralement avant le test de répétition de sprints (pré-exercice) puis une deuxième fois après le test physique (répétition de 6 sprints de 6 secondes sur ergocycle, post-exercice). En post-exercice, les tests Alerte phasique et Motilité oculaire étaient réalisés au repos après le test physique tandis que les tests Balayage visuel et Go/No-Go étaient réalisés pendant un exercice sous-maximal de pédalage.

2.3. Performance musculaire

Lors de chaque phase expérimentale, la performance musculaire a été mesurée à la suite d'un protocole d'échauffement spécifique adopté par les athlètes spécialistes d'épreuves maximales en cyclisme [14]. Le test physique consistait à réaliser une répétition de 6 sprints de 6 secondes avec 25 secondes de récupération sur ergocycle Wattbike® avec une résistance fixe selon le protocole décrit par Marquet et al. (2014) [14]. Les variables suivantes ont été analysées : le pic maximal de puissance (W) et la fatigue (%) qui correspondaient à la différence de pic de puissance entre le meilleur des 6 sprints et le dernier.

2.4. Performance cognitive

2.4.1. Temps de réaction simple

Cette tâche renvoie à un état d'éveil général permettant de réagir rapidement et de manière appropriée aux sollicitations. Pour l'évaluer, un test de temps de réaction simple (TRS) a été réalisé dans lequel une croix apparaît au centre de l'écran avec des intervalles interstimuli variant aléatoirement, le sujet doit réagir aussi rapidement que possible en appuyant sur une touche-réponse. La moyenne des TRS a été calculée sur 20 répétitions. Un temps de réaction inférieur à 160 ms était considéré comme anticipé [15]. Les variables dépendantes utilisées pour ce test sont : la vitesse moyenne de réponse (*mean*), l'écart-type (SD) et le coefficient de variation entre les réponses d'un même bloc (CV).

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

2.4.2. Balayage visuel

Ce test est une épreuve d'exploration de l'environnement visuel qui constitue une capacité de base de la performance attentionnelle du sujet dans une tâche d'attention focalisée. Dans cette épreuve, une matrice de 5 × 5 stimuli est présentée à l'écran et le sujet a pour tâche de détecter si une cible est présente dans cette matrice. Les touches-réponses sont utilisées : l'une pour signaler la présence de la cible et l'autre pour en signaler l'absence. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel interviennent un ensemble d'éléments essentiels : intention et connaissance antérieure du sujet, sa capacité de planification, son champ visuel qui doit être intact, sa capacité à déplacer le foyer attentionnel visuel, ainsi que des mouvements oculaires efficients. Les variables dépendantes analysées pour ce test sont : la vitesse moyenne de réponse (*mean*), l'écart-type (SD), le coefficient de variation entre les réponses d'un même bloc (CV), le pourcentage de fatigue (différence entre la vitesse moyenne de réponse de la fin du test et celle du début de test) ainsi que le pourcentage d'erreur (% erreurs).

2.4.3. Go/No-Go

Il s'agit d'un test d'inhibition décisionnelle qui mesure la capacité à réagir de manière appropriée sous la pression du temps, tout en inhibant les réactions inadéquates.

Ici le foyer attentionnel est dirigé vers les stimuli dont l'occurrence est prévisible et qui exigent une réaction sélective, c'est-à-dire réagir, ou au contraire, s'abstenir de réagir. La forme réalisée est une forme de type « 5 stimuli dont deux cibles » : cinq formes rectangulaires dont la texture est différente apparaissent à l'écran dans un ordre pseudo-aléatoire. Deux de ces figures sont définies comme cibles et nécessitent donc d'appuyer sur la touche-réponse. Les variables dépendantes analysées pour ce test sont : la vitesse moyenne de réponse (*mean*), l'écart-type (SD), le coefficient de variation entre les réponses d'un même bloc (CV) ainsi que le pourcentage d'erreur.

2.4.4. Motilité oculaire

Il s'agit d'un test d'évaluation de la vitesse de modification de la position des yeux (regard) afin de le porter vers les informations importantes de l'environnement. Un stimulus, soit critique, soit neutre, est présenté dans un ordre pseudo-aléatoire à droite ou à gauche d'un point de fixation. Un stimulus critique apparaît également au centre de l'écran à intervalles irréguliers. Le sujet doit réagir le plus rapidement possible dès l'apparition de cette cible. Dans ce test, la latence des saccades oculaires vers la droite ou la gauche est évaluée dans une tâche de réaction. Les variables dépendantes analysées pour ce test sont : la vitesse moyenne de réponse (*mean*), l'écart-type (SD), le coefficient de variation entre les réponses d'un même bloc, le pourcentage de fatigue (différence entre la vitesse moyenne de réponse de la fin du test et celle du début de test) ainsi que le pourcentage d'erreur (% erreur).

2.5. Statistiques

Les données recueillies lors de la phase d'apprentissage ont été recueillies puis analysées grâce au logiciel Excel® avec une variation inférieure ou égale à 10 % entre les deux derniers passages pour valider l'apprentissage.

Concernant la phase expérimentale, chaque variable dépendante a été analysée en utilisant un test paramétrique de Student. Le test *t* pour échantillons appariés a été utilisé incluant les 2 conditions (créatine + guarana, CRE + G et placebo, Pl) à raison de 2 fois par session expérimentale. La taille de l'effet a été calculée en utilisant le *d* de Cohen. Les données ont été analysées à l'aide du logiciel Statistica 7.1 program (StatSoft, France).

Tableau 1 Valeurs de performances musculaires mesurées dans les deux conditions créatine plus guarana (CRE + G) et placebo (Pl).

	Conditions expérimentales	
	Pl	CRE + G
Pic de puissance (W)	1006,82 ± 217,80[a]	1032,76 ± 219,13[a]
Fatigue (%)	−13,44 ± 5,78[a]	−10,04 ± 3,63[a]

[a]Lorsqu'une différence significative existe entre les conditions expérimentales.

3. Résultats

3.1. Performance musculaire

L'ensemble des résultats sont présentés Tableau 1.

3.1.1. Pic de puissance

Une différence significative est observée entre la condition placebo (Pl) et la condition créatine + guarana (CRE + G). Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de puissance sont significativement inférieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 1006,8 ± 217,8 W et 1032,7 ± 219,1 W, $p < 05$, taille d'effet : $d = 0,12$) (Tableau 1).

3.1.2. Pourcentage Fatigue

Pour la fatigue (diminution de la performance), une différence significative est observée entre la condition placebo (Pl) et la condition créatine + guarana (CRE + G). Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de diminution de la performance (fatigue) sont significativement supérieures à celles des conditions CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : −13,44 ± 5,78 % et −10,04 ± 3,63 % $p < 05$, taille d'effet : $d = 0,73$) (Tableau 1).

3.2. Performance cognitive

L'ensemble des résultats sont présentés dans le Tableau 2.

3.2.1. Temps de réaction simple

Que ce soit avant ou après exercice, aucune différence significative n'est relevée entre les deux conditions Pl et CRE + G, ($p > ,05$; NS) (Tableau 2).

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

Tableau 2 Valeurs des performances cognitives mesurées avant ou après l'exercice dans les deux conditions créatine plus guarana (CRE + G) et placebo (Pl).

	Pré exercice		Post-exercice	
	Pl	CRE + G	Pl	CRE + G
Temps de réaction simple				
Vitesse de réponse (ms)	222,55 ± 35,28	221,19 ± 25,38	220,38 ± 33,60	222,98 ± 36,86
Écart-type (ms)	88,60 ± 91,41	64,94 ± 42	74,75 ± 50,97	80,02 ± 84,48
Coefficient de variance (%)				
Balayage visuel				
Vitesse de réponse (ms)	2012,35 ± 414,36	1999,44 ± 593,04	1723,63 ± 282,51[a]	1514,13 ± 296,51[a]
Écart-type (ms)	865,91 ± 303,13	844,96 ± 409, 35	681,04 ± 193,15	649,23 ± 240,67
Coefficient de variance (%)	42,51 ± 8,30	39,74 ± 7,12	41,46 ± 6,78[a]	38,39 ± 6,37[a]
Fatigue (%)	2,85 ± 10,76	4,13 ± 10,49	0,24 ± 10,87	1,89 ± 9,98
Erreur (%)				
Go/No-Go				
Vitesse de réponse (ms)	444,08 ± 69,08	442,16 ± 65,06	453,13 ± 55,04[a]	424,37 ± 50,97[a]
Écart-type (ms)	84,22 ± 29,63	82,85 ± 29,13	88,86 ± 36,23	74,45 ± 31,46
Coefficient de variance (%)	18,62 ± 4,47	18,39 ± 5,69	19,25 ± 6,14	16,30 ± 6,04
Erreur (%)				
Motilité oculaire				
Vitesse de réponse (ms)	545,63 ± 85,51[a]	519,69 ± 68,72[a]	518,78 ± 69,56[a]	481,62 ± 57,30[a]
Écart-type (ms)	134,12 ± 67,65	120,33 ± 62,32	126,19 ± 69,75	123,72 ± 55,97
Coefficient de variance (%)	23,84 ± 8,64	22,36 ± 8,92	23,80 ± 9,88	23,78 ± 8,88
Fatigue (%)	0,07 ± 7,33	0,54 ± 7,58	5,16 ± 8,19	2,59 ± 4,68
Erreur (%)	9,27 ± 10,12	8,24 ± 10,31	7,76 ± 10,58[a]	9,44 ± 9,96[a]

[a]Lorsqu'une différence significative existe entre les conditions expérimentales.

3.2.2. Balayage visuel

Avant l'exercice, aucune différence significative n'est relevée entre les deux conditions Pl et CRE + G, ($p > ,05$; NS).

Après l'exercice, plusieurs différences significatives sont relevées entre les conditions expérimentales.

Une différence significative de vitesse de réponse est observée entre les condition Pl et CRE + G. Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de vitesse de réponse sont significativement supérieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 1723,63 ± 282,51 ms vs 1514, 13 ± 296,51 ms ; $p < 05$ taille d'effet : $d = 0,72$).

Une différence significative du coefficient de variation est également observée entre la condition Pl et la condition CRE + G. Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de coefficient de variation sont significativement supérieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 41,46 ± 6,78 % vs 38,39 ± 6,37 % ; $p < 05$, taille d'effet : $d = 0,50$).

Aucune différence significative entre les conditions n'est relevée pour l'écart-type, le pourcentage de fatigue et le pourcentage d'erreur post-exercice, ($p > ,05$; NS) (Tableau 2).

3.2.3. Go/No-Go

Avant l'exercice, aucune différence significative n'est relevée entre les deux conditions Pl et CRE + G, ($p > ,05$; NS).

Après l'exercice, une différence significative de vitesse de réponse est observée entre les conditions PL et CRE + G. Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de vitesse de réponse sont significativement supérieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 453,13 ± 55,04 ms vs 424,36 ± 50,97 ms ; $p < 05$, taille d'effet : $d = 0,55$).

Aucune différence significative entre les conditions n'est relevée pour l'écart-type, le coefficient de variation et le pourcentage d'erreur post-exercice, ($p > ,05$; NS) (Tableau 2).

3.2.4. Motilité oculaire

Avant l'exercice, une différence significative de vitesse de réponse est relevée entre la condition Pl et la condition CRE + G. Dans la condition Pl, les valeurs moyennes de vitesse de réponse sont significativement supérieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 545,63 ± 85,51 ms vs 519,69 ± 68,72 ms ; $p < ,05$, taille d'effet : $d = 0,48$).

Aucune différence significative entre les conditions n'est relevée pour l'écart-type, le coefficient de variation, le pourcentage de fatigue et le pourcentage d'erreur pré-exercice.

Après l'exercice, une différence significative de vitesse de réponse est relevée entre la condition Pl et la condition CRE + G. Dans condition Pl, les valeurs moyennes de vitesse de réponse sont significativement supérieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 518, 78 ± 69,56 ms vs 481, 62 ± 57, 30 ms ; $p < ,05$, taille d'effet : $d = 0,58$).

Une différence significative du pourcentage d'erreur est relevée entre la condition Pl et CRE + G. Dans la condition Pl, les valeurs de pourcentage d'erreur sont significativement inférieures à celles de la condition CRE + G (respectivement pour Pl vs CRE + G : 7,76 ± 10,58 % et 9,44 ± 9,96 % ; $p < ,05$, taille d'effet $d = 0,21$).

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

Aucune différence significative entre les conditions n'est relevée pour l'écart-type, le coefficient de variation et le pourcentage de fatigue mesurés post-exercice, ($p > ,05$; NS) (Tableau 2).

4. Discussion

Cette étude avait pour objectif d'étudier l'effet de l'ingestion d'un complément à base de créatine et de guarana comparé à un placebo sur les performances cognitives et musculaires. Les résultats principaux montrent :

- une amélioration des performances cognitives décisionnelles et de vigilance après ingestion du complément CRE + G ;
- une amélioration de la puissance musculaire ainsi qu'une diminution de la fatigabilité lors de la répétition de sprints après ingestion du complexe ;
- aucun effet significatif de l'ingestion du complexe CRE + G sur la performance attentionnelle simple.

La caféine et la créatine sont les composés les plus largement utilisés dans le milieu sportif. Parfois utilisés de façon simultanée, ces deux composés possèdent un effet ergogénique sur la performance physique et cognitive mais peuvent aussi présenter des effets secondaires. Les effets de la caféine sur la performance cognitive, dont le mécanisme est basé sur une action antagoniste aux récepteurs d'adénosine, ont été démontrés à plusieurs reprises. Les premières études réalisées en condition de privation de sommeil ont montré qu'une supplémentation en caféine présentait des effets bénéfiques sur la vigilance, le temps de réaction, l'éveil, la mémoire ou encore l'humeur [16]. Plusieurs études ont aussi révélé un effet bénéfique de la caféine à la fois sur la performance physique et cognitive (pour revue voir Tarnopolsky, 2010 [11]). L'ingestion de caféine permet de diminuer la douleur, la sensation perçue de l'effort, d'améliorer l'attention [8], mais aussi d'améliorer la force et l'endurance musculaire [7]. Dans une récente étude, De Pauw et al. (2015) [17] montrent également des effets bénéfiques de la caféine en rinçage de bouche sur la performance cognitive ainsi que sur l'éveil cortical. Ces derniers résultats sont très prometteurs puisque le rinçage de bouche entraîne un mécanisme central via les récepteurs de la cavité orale qui permet une activation préférentielle du cortex préfrontal, orbitofrontal et dorsolatéral [17]. Néanmoins, l'ingestion de caféine induit une grande variabilité inter-individuelles des réponses ainsi que plusieurs effets secondaires tels que : des désordres gastro-intestinaux, une effet de manque pouvant engendrer des céphalées, une vision floue, des vertiges, ou d'une sensation de fatigue [7,11,16].

Afin de limiter les effets secondaires liés à l'ingestion de caféine, l'attention a récemment été portée sur le guarana, utilisé comme stimulant dans de nombreux compléments nutritionnels à destination des athlètes et qui semble présenter des effets positifs sur la performance cognitive mais sans les effets secondaires associés à la caféine [9]. À notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'effet du guarana seul sur la performance physique, en revanche, plusieurs travaux ont montré un effet bénéfique sur la cognition au repos. Lors de l'une des premières études sur l'influence du guarana sur la performance cognitive, Kennedy et al. (2007) [18] ont montré que le guarana associé à un complexe multi-vitaminé permet d'atténuer la fatigue mentale et d'augmenter la vitesse et la précision dans les tâches de Rapid Visual Information Processing (RVIP). Les tâches de RVIP, sensibles aux dysfonctions des lobes frontaux et pariétaux, mesurent l'attention soutenue ainsi que la performance générale. Dans une étude dose-réponse, Haskell et al. (2007) [10] indiquent que l'ingestion d'une dose de 75 mg de guarana semble être optimale. Ces effets ne peuvent être attribués à la présence seule de caféine considérée comme trop faible (9 mg) pour produire un effet actif mais plus à son interaction avec d'autres composés. Espinola et al. (1997) [19] ont montré lors d'une étude sur les rats que la seule dose de caféine contenue dans le guarana ne pouvait expliquer l'ensemble des effets trouvés sur la fonction cognitive. Il semblerait donc que les mécanismes d'action entre la caféine et le guarana soient différents et cela même si le guarana contient environ 6 % à 12 % de caféine. Campos et al. (2005) [20] ont montré que si le cyclopentyle adénosine, un agoniste de l'adénosine pouvait bloquer l'action de la caféine, cela n'était pas le cas avec le guarana. Les propriétés psychoactives du guarana pourraient être attribuables à plusieurs autres composés psychoactifs tels que les tannins et les saponines [19] mais aussi les vitamines et les minéraux [10]. Dans notre travail, la quantité de guarana présente dans le supplément CRE + G (1500 mg) est supérieure à celle utilisée dans de nombreuses études (75 mg pour Kennedy et al., 2004 ; 300 mg pour Pomportes et al., 2014 et 222,2 mg pour Kennedy et al., 2007 [9,18,21]). Dans l'étude de Haskell et al. (2007) [10] sur l'effet dose-réponse, les doses de guarana les plus faibles 37,5 et 75 mg présentent des meilleurs effets sur la performance cognitive que les doses les plus élevées (150 et 300 mg). L'ingestion d'une dose de 75 mg de guarana semble produire les meilleurs effets sur la performance cognitive (Haskell et al., 2007 [10]). Dans ce cadre il est à noter que si les quantités de guarana présentes dans l'ensemble des suppléments nutritionnels sont en dessous de la quantité nécessaire pour induire un effet néfaste, plusieurs jeunes adultes ont été admis aux urgences en raison d'un overdose de caféine après ingestion de forte doses de guarana (Smith et al., 2006 [22]).

Nos résultats indiquent une amélioration des performances cognitives décisionnelles et de vigilance après ingestion de complément CRE + G. Ces résultats sont en accord avec les précédentes études comparant l'ingestion de guarana et d'un placebo au repos. Récemment Pomportes et al. (2014) [9], ont étudié l'effet de l'ingestion de guarana comparé à un placebo sur la variabilité cardiaque et le fonction cognitive au repos. Les résultats indiquaient un effet bénéfique de la supplémentation sur les tâches d'inhibition de la réponse de type Go/No-Go entre 30 et 90 minutes après l'ingestion mais pas d'effet sur le temps de réaction simple. Les résultats de notre étude sont similaires à ceux de cette étude puisque à la suite de l'ingestion du complexe CRE + G la performance dans la tâche de Go/No-Go est améliorée tandis que le temps de réaction simple n'est pas modifié. Il est à noter que dans notre étude, aucun effet du supplément n'est détecté au repos ce qui diffère des précédentes études. Il est possible que le test au repos ait été réalisé

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

trop tôt après l'ingestion du complément puisque les tests débutaient immédiatement à la fin de la seconde prise de boisson.

Quelques études se sont intéressées à l'effet de la créatine sur la cognition mais dans des situations de stress. McMorris et al. (2007) [12], montrent un effet bénéfique de la créatine lors d'un exercice modéré sur la performance cognitive en cas de privation de sommeil. Après 24 h de privation de sommeil, la supplémentation en créatine induit un effet positif sur l'humeur et sur les performances cognitives complexes. De façon similaire, en condition d'hypoxie, une supplémentation en créatine améliore les capacités attentionnelles, la performance cognitive et augmente l'excitabilité corticomotrice (Turner et al., 2015 [23]). La créatine est donc également un composé psychoactif qui, en augmentant la créatine cérébrale et la phosphocréatine, permettrait d'augmenter les processus cognitifs [13].

Le second résultat important de notre étude est l'effet positif du complexe CRE + G sur la performance musculaire. Après ingestion, nos athlètes sont capables de développer un pic de puissance significativement supérieur à celui relevé dans la condition placebo (+2,5 %), (taille de l'effet : $d = 0{,}12$, effet faible) ainsi qu'une diminution moins importante des performances au cours de la répétition de sprints (−3,4 %) (taille de l'effet : $d = 0{,}73$, effet fort).

Ces résultats sont cohérents à ceux trouvés dans les différentes études qui ont testé l'effet de l'ingestion de Créatine sur la performance explosive (pour revue Kreider, 2003 [24]). Un apport exogène de créatine, considéré permet d'augmenter les réserves musculaires en phosphocréatine (PCr) et en créatine et améliore la puissance explosive dans laquelle le métabolisme anaérobie est prédominant. Dans une revue de question sur le sujet, Kreider (2003) [24], indique qu'une supplémentation en créatine peut entraîner un gain de force de 15 %, une amélioration de la performance de 1 à 5 % sur un effort de sprint isolé et de 5 à 15 % sur une répétition de sprints. Bien que nos résultats soient cohérents à ceux de la littérature, notre gain de puissance reste cependant inférieur à celui reporté par Kreider. Cela peut s'expliquer par le fait que la méthode de supplémentation en créatine est généralement réalisée sur un court terme (4—5 jours), voire un long terme (1 mois) alors que dans notre étude la supplémentation n'a été réalisée qu'en une seule dose (1000 mg), scindée en deux prises 60 et 30 minutes avant le début de l'exercice. Les mécanismes explicatifs de l'effet de la créatine seraient qu'un niveau initial en créatine phosphate augmenterait sa disponibilité et augmenterait sa vitesse de resynthèse lors des périodes de récupération. Il est à noter également que si la créatine monohydrate ne semble pas présenter pas de risque pour la santé des consommateurs, pour de fortes doses, 5 % des consommateurs peuvent présenter des troubles gastro-intestinaux [11].

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'étudier les effets d'un complexe associant la créatine au guarana (CRE + G) habituellement utilisé par les athlètes sur les performances physiques et cognitives à l'effort. Nos résultats montrent que ce complexe influence favorablement la performance physique avec un effet bénéfique faible sur le pic de puissance et un effet bénéfique fort sur la fatigabilité. La performance cognitive est également positivement influencée pour les tâches de vigilance, de Go/No-Go et de motilité oculaire. En revanche, à l'inverse des études avec utilisation de la caféine, le complexe n'a pas d'effet sur le temps de réaction simple. Il sera nécessaire d'isoler les substances actives de ce complément afin de pouvoir déterminer l'impact exact de chacun sur les performances physiques et cognitives à l'effort.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Remerciement

Ce travail a été supporté par un financement de l'Institut national du sport de l'expertise et de la performance dans le cadre de l'appel à projet en matière de performance et de sport de haut niveau.

Références

[1] Etnier JL, Chang YK. The effect of physical activity on executive function: a brief commentary on definitions, measurement issues, and the current state of the literature. J sport Exerc Psychol 2009;31:469—83.
[2] Brisswalter J, Collardeau M, Rene A. Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. Sports Med 2002;32(9):555—66.
[3] Lambourne K, Tomporowski P. The effect of exercice-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. Brain Res 2010;1341:12—24.
[4] Chodzko-Zajko WJ. Physical fitness cognitive performance, and aging. Med Sci Sports Exerc 1991;23(7):868—72.
[5] Meeusen R, De Meirleir K. Exercice and brain neurotransmission. Sports Med 1995;20(3):160—88.
[6] Chmura J, Krysztofiak H, Ziemba AW, Nakar K, Kaciuba-Uscilko H. Psychomotor performance during prolonged exercice above and below the blood lactate threshold. Eur J Appl Physiol 1998;77(1—2):77—80.
[7] Meeusen R. Exercice nutrition and the brain. Sports Med 2014;44(1):47—56.
[8] Glade MJ. Caffeine — not just a stimulant. Nutrition 2010;26(10):932—8.
[9] Pomportes L, Davranche K, Brisswalter I, Hays A, Brisswalter J. Heart rate variability and cognitive function following a multi-vitamin and mineral supplementation with added guarana (Paullinia cupana). Nutrients 2014;7(1):196—208.
[10] Haskell CF, Kennedy DO, Wesnes KA, Milne AL, Scholey AB. A double-blind, placebo-controlled, multi-dose evaluation of the acute behavioural effects of guaraná in humans. J Psychopharmacol 2007;21(1):65—70.
[11] Tarnopolsky MA. Caffeine and creatine use in sport. Ann Nutr Metab 2010;57(2):1—8.
[12] McMorris T, Harris RC, Howard AN, Langridge G, Hall B, Dicks M, et al. Creatine supplementation, sleep deprivation, cortisol, melatonin and behavior. Physiol Behav 2007;90:21—8.
[13] Rawson ES, Venezia AC. Use of creatine in the elderly and evidence for effects on cognitive function in young and old. Amino Acids 2011;40(5):1349—62.

[14] Marquet LA, Hausswirth C, Hays A, Vettoretti F, Brisswalter J. Comparison of between-training-sessions recovery strategies for world-class BMX pilots. Int J Sports Physiol Perform 2014;10(2):219—23.

[15] Collardeau M, Brisswalter J, Audiffren M. Effects of a prolonged run on simple reaction time of well-trained runners. Percept Mot Skills 2001;93(3):679—89.

[16] Lieberman HR, Tharion WJ, Shukitt-Hale B, Speckman KL, Tulley R. Effects of caffeine, sleep loss, and stress on cognitive performance and mood during U.S. Navy SEAL training. Psychopharmacology 2002;164(3):250—61.

[17] De Pauw K, Roelands B, Knaepen K, Polfliet M, Stiens J, Meeusen R. Effects of caffeine and maltodextrin mouth rinsing on P300, brain imaging, and cognitive performance. J Appl Physiol 2015;118(6):776—82, http://dx.doi.org/10.1152/japplphysiol.01050.2014.

[18] Kennedy DO, Haskell CF, Robertson B, Reay J, Brewster-Maund C, Luedemann J, et al. Improved cognitive performance and mental fatigue following a multi-vitamin and mineral supplement with added guaraná (Paullinia cupana). Appetite 2007;50:506—13.

[19] Espinola EB, Dias RF, Mattei R, Carlini EA. Pharmacological activity of guarana (Paullinia Cupana Mart.) in laboratory animals. J Ethnopharmacol 1997;55(3):223—9.

[20] Campos AR, Barros AI, Albuquerque FA, Leal LK, Rao VS. Acute effects of guarana (Paullinia cupana Mart.) on mouse behaviour in forced swimming and open field tests. Phytother Res 2005;19(5):441—3.

[21] Kennedy DO, Haskell CF, Wesnes KA, Scholey AB. Improved cognitive performance in human volunteers following administration of guarana (Paullinia cupana) extract: comparison and interaction with Panax ginseng. Pharmacol Biochem Behav 2004;79:401—11.

[22] Smith AP, Christopher G, Sutherland D. Effects of caffeine in overnight-withdrawn consumers and non-consumers. Nutr Neurosci 2006;9(1—2):63—71.

[23] Turner CE, Byblow WD, Gant N. Creatine supplementation enhances corticomotor excitability and cognitive performance during oxygen deprivation. J Neurosci 2015;35(4):1773—80.

[24] Kreider RB. Effects of creatine supplementation on performance and training adaptations. Mol Cell Biochem 2003;244:89—94.

Pour citer cet article : Pomportes L, et al. Effet d'un complexe créatine—guarana sur la puissance musculaire et la performance cognitive chez des sportifs de haut niveau de performance. Sci sports (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2015.04.002

sports

MDPI

Article

Effect of Carbohydrate Intake on Maximal Power Output and Cognitive Performances

Laura Pomportes [1,2,*], Jeanick Brisswalter [1], Arnaud Hays [3] and Karen Davranche [4,*]

1 Université Cote d'Azur, Laboratoire Motricité Humaine Expertise Sport Santé, Nice 06205, France; brisswalter@unice.fr
2 CREPS PACA, Aix en Provence 13098, France
3 Aix-Marseille Université, CNRS, ISM, Marseille 13288, France; arnaud.hays@univ-amu.fr
4 Aix-Marseille Université, CNRS, LPC UMR 7290, Marseille 13331, France
* Correspondence: laurapomportes@hotmail.fr (L.P.); karen.davranche@univ-amu.fr (K.D.); Tel.: +33-413-551-135 (K.D.)

Academic Editor: Beat Knechtle
Received: 30 July 2016; Accepted: 26 September 2016; Published: 9 October 2016

Abstract: The present study aimed to assess the beneficial effect of acute carbohydrate (7% CHO) intake on muscular and cognitive performances. Seventeen high levels athletes in explosive sports (fencing and squash) participated in a randomized, double-blind study consisting in series of 6 sprints (5s) with a passive recovery (25s) followed by 15 min submaximal cycling after either maltodextrine and fructose (CHO) or placebo (Pl) intake. Cognitive performances were assessed before and after sprint exercise using a simple reaction time (SRT) task at rest, a visual scanning task (VS) and a Go/Nogo task (GNG) during a submaximal cycling exercise. Results showed a beneficial effect of exercise on VS task on both conditions (Pl: −283 ms; CHO: −423 ms) and on SRT only during CHO condition (−26 ms). In the CHO condition, SRT was faster after exercise whereas no effect of exercise was observed in the Pl condition. According to a qualitative statistical method, a most likely and likely positive effect of CHO was respectively observed on peak power (+4%) and tiredness (−23%) when compared to Pl. Furthermore, a very likely positive effect of CHO was observed on SRT (−8%) and a likely positive effect on visual scanning (−6%) and Go/Nogo tasks (−4%) without any change in accuracy. In conclusion acute ingestion of 250 mL of CHO, 60 min and 30 min before exercise, improve peak power output, decrease muscular tiredness and speed up information processing and visual detection without changing accuracy.

Keywords: CHO; maximal muscular performance; information processing

1. Introduction

Classically, the ergogenic effects of carbohydrate (CHO) ingestion on physical performance have been demonstrated in the field of sports nutrition research. Indeed, as early as 1925, Gordon et al. [1] reported that ingestion of candy by runners during a marathon prevented hypoglycemia and improved race times when compared with no sugar. The "metabolic response" of CHO feeding allows maintaining plasma glucose concentration and high rates of carbohydrate oxidation, sparing hepatic glycogen, delaying muscle glycogen depletion and preventing hypoglycemia [2]. The beneficial effect of CHO supplementation during exercise also seems to affect the central nervous system (CNS) by increasing or maintaining the substrate delivery to the brain and avoiding hypoglycemia, which is known to impair brain function and cognitive performances [3]. Further evidences suggest that CHO may have a "non-metabolic" central effect. According to the "Central Fatigue hypothesis" proposed by Newholme et al. in 1987 [4], tryptophan (which is an essential amino acid and a precursor of serotonin) is associated with central nervous system fatigue during prolonged exercise. It appears that CHO

feeding decreases the amount of tryptophan crossing the blood–brain barrier and consequently leads to lower serotonin concentrations in the brain [3,5].

The positive effect of CHO feedings on performance has been mainly observed during prolonged exercise (>1 h) (for review see [6]). Endurance exercise has been associated with a decrease in CHO availability that includes significant glycogen reduction, low blood glucose, and elevations in free fatty acids. These phenomena can be avoided by CHO feedings. In intermittent sports that required brief high-intermittent exercise, more mixed results have been reported. Most studies report an enhancement of intermittent high-intensity exercise capacity (measured by the duration to fatigue and distance covered) with CHO supplementation before and during exercise (for review see [7]). Mixed results are reported on other aspects of intermittent sport performance such as sprinting, jumping, skill, change of direction speed, and cognitive function (for review see [8]). For short duration exercise the effect of CHO feeding is unlikely explained by a metabolic response but more by an ergogenic effect highlighted using mouth rinsing. In a study employing a Loughborough Intermittent Shuttle Test (LIST) protocol (mimicking the demands of soccer and similar team sports), Dorlin and Earnest [9] found no effect of mouth rinsing 6.4% maltodextrin, in comparison with a mouth rinsing placebo. By contrast, using a self-selected pacing LIST protocol, Rollo et al. [10] reported improved sprint performance with mouth rinsing 10% maltodextrin compared to a placebo. It is likely that CHO mouth rinsing exerts a positive effect through a central action mediated by receptors in the mouth or gastro-intestinal tract, improving motor drive or motivation [11–14]. Gant et al. [11] first showed that CHO in the mouth immediately increases the excitability of the cortico-motor pathway, prior to ingestion. More recently, using a qualitative approach, De Pauw et al. [12] showed an increased activity within the orbitofrontal cortex during maltodextrine mouth rinse, but did not report any change on response speed in a Stroop task. The improvement in exercise performance observed when CHO is present in the mouth can be explained by an activation of regions involved in reward and motor control (primary taste cortex and dorsolateral prefrontal cortex) [13] and by increasing the primary sensorimotor cortex, which enhances activation of neural networks involved in sensory perception [14]. The effect of CHO ingestion on sprint performance, however, remains unclear. In a review on this topic, Baker et al. indicate that most of the studies report no benefit of CHO ingestion on sprint performance [8]. However some of them indicate that CHO ingestion could improve performance. For example, Gant et al. [11] reported enhanced sprint performance during a 60-min LIST protocol when soccer players ingest a 6.2% CHO solution, and Ali et al. [15] reported similar benefit with a 6.4% CHO solution during a 90-min LIST protocol. Additionally, Lee et al. [16] showed that CHO intake prior to exercise provided a significant benefit on repetition sprint performance in female athletes. Finally, Welsh et al. [17] and Winnick et al. [18] reported improvement in sprint performance when basketball players respectively intake 80 g of carbohydrate per hour (g/h) and 40 g/h.

Intermittent court sports like squash or fencing are characterized by intermittent bursts of high-intensity exercise and require the execution of complex sport-specific skills and cognitive tasks over a prolonged period of time of several times per day [8]. Athletes have to simultaneously perform very intense short exercises and make decisions under strong temporal pressure. The physiological effects of exercise on cognitive performance have been well documented [19,20]. According to the different meta-analyses on exercise and cognition, the presence or absence of a beneficial effect of exercise on cognitive performance depends on the nature of the cognitive task but also on exercise intensity and duration [21]. A positive effect of acute moderate exercise is generally explained by an activation of the CNS, with the assumption that exercise-induced physical arousal leads to a narrowing of attentional focus [22], whereas a heavy exercise or prolonged exercise to exhaustion leads to a decrease in cognitive performance [23]. Within this framework, it has been suggested that nutritional supplementation could help to limit central fatigue and increase or maintain cognitive abilities [24]. For example, cognitive performance improvement has been observed during exercise when CHO was ingested before or during exercise [22,25–27]. Collardeau et al. 2001 [22] showed that consumption of a 5.5% CHO electrolyte solution before and during a 100-min run improved the

reaction time (RT) of triathletes at the end of exercise. Bottoms et al. [25] also reported that ingestion of a 6.4% CHO drink improved RT performances during a simulated squash play. Lieberman et al. [26] found that supplemental CHO beverages (12%) enhance vigilance and mood during sustained aerobic exercise (road march and run), and Utter et al. [27] reported that CHO availability attenuates exertion perceptions during the last stages of 2.5 h high-intensity cycling and running exercise.

The current state of the art showed that CHO feedings could improve both physical and cognitive performances; however, the effect of CHO supplementation on cognitive functions has been essentially assessed during endurance exercises. The present study aimed to investigate the effect of CHO supplementation on intermittent sport performance, more particularly on sprint and cognitive performances, during a protocol involving brief high-intermittent exercise in high-level athletes in intermittent sports (e.g., squash and fencing).

2. Methods

2.1. Participants

Seventeen high-level squash and fencing athletes (Table 1) (7 females and 10 males) volunteered in the study. Participants were used to training on a cycle ergometer and cycling as a normal part of their daily training program. The experimental procedures were explained to the subjects and a written informed consent was provided and signed prior to inclusion. The present study was approved by the University Ethics Committee.

Table 1. Anthropometrical and physiological characteristics of participants.

Variables	All Mean ± Standard Error	Squash Athletes	Fencing Athletes
Sample size	17	8	9
Age (years)	19.1 ± 1	20.8 ± 2	17.3 ± 0.3
Height (cm)	170.6 ± 2	174.5 ± 4	167.1 ± 3
Body mass (kg)	63.9 ± 3	67.1± 5	61.1 ± 2
Body fat (%)	15.3 ± 1	11.9 ± 1	18.4 ± 2
VO_{2max} ($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)	48.5 ± 2	50.7 ± 1	47.5 ± 4
Heart $rate_{max}$ ($batt \cdot min^{-1}$)	200.8 ± 2	199.2 ± 2	202 ± 3
Blood lactate post test ($mmol \cdot L^{-1}$)	12.7 ± 1	12.7 ± 1	12.8 ± 1
Maximal aerobic speed ($km \cdot h^{-1}$)	14.5 ± 0.4	16.2 ± 0.4	14.5 ± 0.5

2.2. Design

2.2.1. Preliminary Session

One week before the experimental sessions, a preliminary testing was performed to collect anthropometric and physiological characteristics. Body weight was measured to 0.1 kg using a standard beam balance. Height was measured to 0.5 cm using a Holtain wall mounted stadiometer. In all subjects, four skinfold thickness (biceps, triceps, subscapular, suprailiac) were measured in triplicate, by the same trained observer. Measurements were made on the right-hand side of the body using a Holtain caliper. Body fat was calculated using the Siri equation. Maximal oxygen uptake (VO_{2max}) was determined during a field maximal incremental exercise according to the protocol proposed by Léger and Boucher [28]. The speed of the last fully completed step corresponds to the maximal aerobic speed. During the test, oxygen uptake (VO_2), carbon dioxide uptake (VCO_2), minute ventilation (VE) and the respiratory exchange ratio (RER) were continuously recorded using a breath-by-breath analyzer (K4b2, Cosmed®, Rome, Italy) which was calibrated prior to each test. Heart rate was collected using a monitor (Polar RS800). Before and 3 min after running sessions, blood lactate concentrations were measured (LactatePro, Arkray Factory Inc., Shiga, Japan).

The target heart rate of the experimental sessions was determined from a competition simulation respectively in squash (5 players) and fencing (5 players) against a similar level opponent. For the squash simulation, 5 games of 11 points (1 for each players lasting between 8 and 13 min) were recorded and analyzed, whereas for fencing athletes, 5 matches of 3 min were recorded. From these records, the relative intensity was set at 80% of HR_{max} for fencing athletes and 85% FC_{max} for squash athletes.

2.2.2. Familiarization Session

Seventy-two hours prior to the first experimental session, subjects underwent a familiarization session with the repeated sprint effort protocol on a cycle ergometer and with the following cognitive tasks (CT): simple reaction time (SRT), visual scanning and Go/Nogo tasks (TAP software 2.3 version 3, P. Zimmermann and B. Fimm). For CT, the learning criteria was achieved when response variability was equal or less than 10% compared to the preceding cognitive performance.

2.2.3. Experimental Session

Each subject participated in two counterbalanced experimental sessions separated by 1 week at the same time of the day. Subjects were instructed to keep a food diary during the 2 days prior the first session and to replicate this diet before each session. Subjects were required to refrain from alcohol, caffeine, drugs, and nutritional supplements during the 48 h prior the sessions. The last meal was taken at least 3 h prior the start of the experimental session. No food or drinks intake (except water) was allowed between the last meal and the experimental session. The subjects were not used to regularly drinking nutritional supplementation during training or competitions. They were instructed to control their time and hours of sleep the 2 nights preceding the experimental sessions. Light trainings were permitted in the morning of the experimental sessions whereas physical training (including endurance or resistance training) or high-intensity technical sessions were not allowed. Subjects were required to maintain the same training program every week during the experimental protocol.

During each experimental session, subjects ingested 60 min (Ing1) and 30 min (Ing2) before exercise either 250 mL of a 7% carbohydrate complex (CHO: fructose and maltodextrine, Isoxan Sport,) or placebo (Pl, 250 mL tap water added with orange sugarless syrup). Immediately after the second ingestion subjects performed the first cognitive tests block (i.e., CT). Then, subjects warmed up (standardized warm up) and after 3 min recovery performed, they performed a repeated sprint test in order to assess maximal power output. Immediately after this test, subjects completed one block of SRT. Finally, they performed a 15 min submaximal cycling exercise at 80% and 85% HR_{max}, respectively for fencing and squash athletes, during which they performed the visual scanning and Go/Nogo tasks (Figure 1).

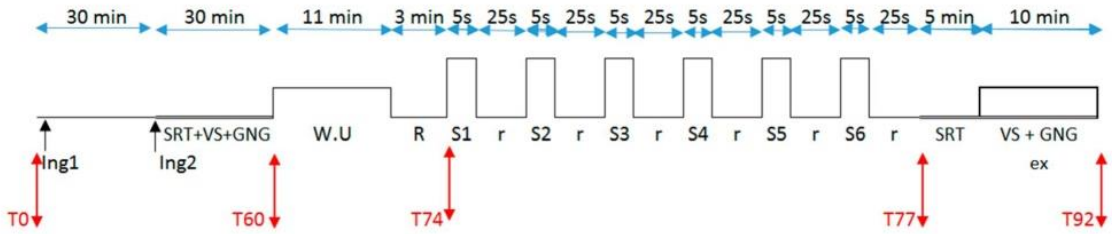

Figure 1. Overview of the experimental design. Notes: Ing = ingestion, W.U = warm up, R = rest 3 min, S1 to S6 = sprints 5 s, r = 25 s rest, SRT = simple reaction time, VS = visual scanning, GNG = Go/Nogo tasks, ex = cycling exercise, T = time (minutes).

2.3. Repeated Sprint Test

Maximal power output was assessed during the repeated sprint test on a Wattbike cycle (Wattbike Pro, Nottingham, UK). This ergometer has been designed to simulate "real" cycling with a suitable power output range (0 to 3760 watts) for short-duration, high-intensity testing, or training,

and has been previously validated to assess sprint performance in cyclists [29]. After a specific warm up for sprint performance, subjects performed 6 × 5 s sprints (S1 to S6), with a 25 s passive recovery between each sprint (the resistance was set at the minimum, resistance 1). Maximal power output was recorded for each sprint, and tiredness (%) was calculated using the difference between maximal power output for the best and the last sprint.

2.4. Cognitive Tasks (CT)

During the two experimental sessions, subjects were comfortably seated on the cycle ergometer facing a computer screen 1 meter away. Two joysticks were installed on the ergocycle. Participants were required to complete the CT that consisted in a series of 3 cognitive tasks (i.e., SRT, visual scanning and Go/Nogo tasks) before and after the series of 6 sprints. The SRT was performed at rest immediately after the sprints, and the visual scanning and Go/Nogo tasks were performed while cycling about 15 min at 80% and 85% HRmax respectively for fencing and squash athletes.

2.4.1. Simple Reaction Time (SRT)

Simple reaction time is a perceptual-motor task indicative of the efficiency of the individual's ability to process information. In the SRT task, subjects were asked to respond as quickly as possible to the visual known stimuli by pressing the button of a joystick with their dominant hand. The SRT task duration was about 3 min 30 s.

2.4.2. Visual Scanning Task

Visual scanning task (TAP 2.3 software) is an attention/perceptual task, during which subjects had to search a display for a given stimulus. The display was a matrix on a row-by-row or column-by-column basis (5 × 5 stimuli). Subjects were instructed to press one key response as soon as possible when they detected the target stimulus, and to press another key response when the target stimulus was absent. The visual scanning task duration was about 5 min.

2.4.3. Go/Nogo Task

The Go/Nogo task evaluates inhibitory control. Subjects were instructed to respond to stimuli and withhold the response to other stimuli. In the present version of the task (TAP 2.3 software), five squares with different patterns appeared on the screen. Two of these squares were defined as target stimuli. Subjects were instructed to press a key response as soon as possible when a target stimulus was presented, and withhold their response when a non-pertinent stimulus appeared. The Go/Nogo task duration was about 3 min.

2.5. Statistical Analysis

Results were analyzed using consecutively quantitative and qualitative methods. All data are expressed as the mean ± standard error. For sprint performance (i.e., mean peak power and tiredness of 6 sprints), difference between conditions was assessed using a paired t-test. For cognitive performances, a repeated measures ANOVA (condition × period) was performed. Post-hoc Newman-Keuls analyses were conducted for all significant effects. Significance was set at $p < 0.05$ for all analyses. We also reported probabilistic magnitude-based inferences for all variables data using methods described by Hopkins et al. [30], which has been applied in several recent nutritional studies [14]. To compare within-trial changes between trials, we used a modified statistical spreadsheet. This spreadsheet calculates the between-trial standardized differences or effect sizes (ES, 90% confidence interval [CI]) using the pooled standard deviation. If the chance of benefit or harm were both >5% the true effect was reported as unclear. Otherwise, chances of benefit or harm were assessed as follows: <1%, almost certainly not; 1%–5%, very unlikely: 5%–25%, unlikely; 25%–75%, possible; 75%–95%, likely; 95%–99%, very likely; >99%, most likely [5].

3. Results

3.1. Sprint Performance

There were no significant differences between conditions (CHO vs. Pl) on peak power and tiredness. Magnitude-based inferences showed that CHO ingestion has a most likely positive effect on peak power (99%, CI: 9.4/48.8 watts) (Figure 2A,B). Mean peak power was 1043 ± 255 watts in CHO and 1007 ± 218 watts in Pl. Furthermore a likely positive effect (77%, CI: 0.8/5.2%) was observed on tiredness (Figure 2C) with a lower decrease of peak power among sprints when compared to Pl (respectively for CHO and Pl: −11% ± 4.9% vs. −13% ± 5.8%).

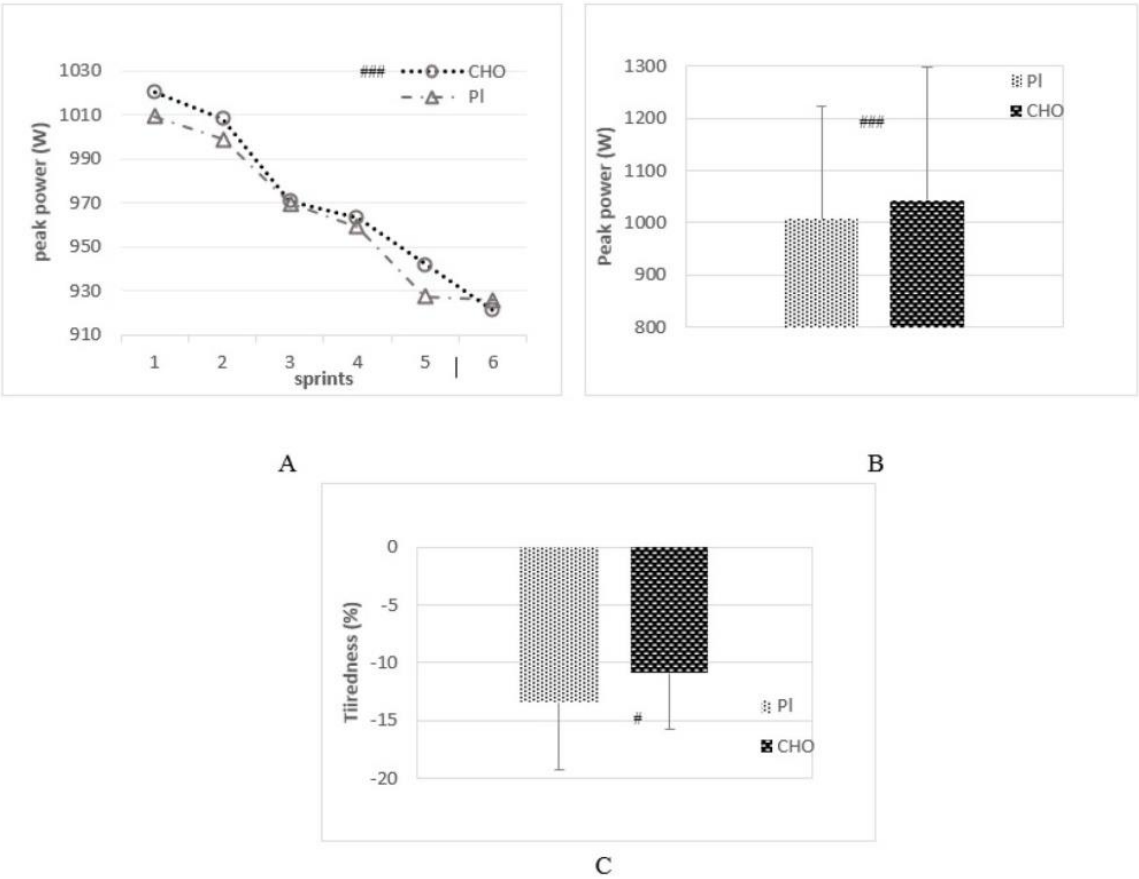

Figure 2. Evolution of peak power with sprint (**A**); peak power (**B**) and tiredness (**C**) with placebo (Pl) and carbohydrate (CHO) ingestion (mean ± standard error). Notes: # when a qualitative statistics shown an effect compared with Pl condition: # likely effect, ## very likely effect and ### most likely effect.

3.2. Cognitive Performance

An overview of the results for cognitive performance is shown on Table 2.

Table 2. Cognitive performance prior and after sprints repetition for Pl and CHO ingestion.

Variables	Prior sprints		After sprints	
	Pl Mean ± Standard Error	CHO	Pl	CHO
SRT			*At rest*	
RT (ms)	222.5 ± 9	229.0 ± 8	220.4 ± 8 $^{\$}$	203.1 ± 5 $^{\$,£,\#,*}$
SD (ms)	88.6 ± 22	67.0 ± 15 $^{£}$	74.8 ± 12	108.9 ± 22 $^{£}$
Visual Scanning			*During cycling exercise*	
RT (ms)	2010.3 ± 107	2054.1 ± 133	1726.8 ± 73 $^{\$,*}$	1630.6 ± 76 $^{\$,£,*}$
SD (ms)	867.3 ± 78	829.0 ± 75 $^{£}$	689.6 ± 49 $^{\$,*}$	665.2 ± 60 $^{\$,*}$
Tiredness (%)	3.8 ± 3	5.5 ± 2	1.5 ± 2 $^{\$}$	−0.4 ± 2 $^{\$}$
Errors (%)	4.8 ± 1	5.9 ± 2 $^{£}$	7.1 ± 1 $^{\$,*}$	7.8 ± 1 $^{\$,*}$
Go/Nogo			*During cycling exercise*	
RT (ms)	444.1 ± 17	453.1 ± 13	453.1 ± 18 $^{\$}$	435.4 ± 12 $^{\$,£}$
SD (ms)	84.2 ± 7	88.9 ± 9 $^{£}$	90.1 ± 9	79.1± 8 $^{£}$
Errors (%)	6.3 ± 2	5.3 ± 1	2.6 ± 1 $^{\$}$	4.9 ± 1 $^{\$}$

Notes: * quantitative statistics shown an exercise effect (Pre sprints $_{Pl/CHO}$ vs. Post sprints $_{Pl/CHO}$); # quantitative statistics shown a nutritional effect ($Pl_{pre/post}$ vs. $CHO_{pre/post}$); $ qualitative statistics shown an exercise effect (Pre sprints $_{Pl/CHO}$ vs. Post sprints $_{Pl/CHO}$); £ qualitative statistics shown a nutritional effect ($Pl_{pre/post}$ vs. $CHO_{pre/post}$).

3.2.1. Simple Reaction Time (SRT)

A significant interaction effect between exercise and condition was observed on mean RT ($F_{(1,16)} = 6.95$, $p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.30$). In the CHO condition, RT was faster after exercise (−11%) compared to pre-exercise and faster than Pl post-exercise (−7.9%). No effect of exercise was observed in the Pl condition (−1%). Magnitude-based inferences showed that the effect of exercise is likely positive (93%, CI: −43.3/8.7 ms) on RT (i.e., faster RT) on both conditions, and the effect of CHO ingestion, compared to Pl, is likely positive (96%, CI: −15.5/3.7 ms) on RT performance decrease after exercise.

No significant effect of nutritional supplementation and/or exercise was found on standard deviation (respectively $F_{(1,16)} = 0.11$, $p = 0.074$, $\eta_p^2 = 0.007$ and $F_{(1,16)} = 1.05$, $p = 0.032$, $\eta_p^2 = 0.06$). Magnitude-based inferences showed that the effect of CHO ingestion, compared to Pl, is likely positive (78% CI: −23/11 ms) on SD before sprints and likely negative (90%, CI: −8/16 ms) on SD (i.e., increase in SD) after sprints indicating a higher variability in response after exercise.

3.2.2. Visual Scanning

Results showed a main effect of exercise ($F_{(1,15)} = 24.78$, $p = 0.000$, $\eta_p^2 = 0.62$) on RT during visual scanning regardless of the conditions. Reaction time was faster after exercise for Pl (−14%) and CHO (−21%) ($p < 0.001$). Magnitude-based inferences showed that the effect of exercise is most likely positive (100%, CI: −148/−67 ms) in both conditions. Furthermore, CHO ingestion has a likely positive effect (86%, CI: −12.2/−0.2) on RT when compared to Pl during exercise.

Results showed a main effect of exercise ($F_{(1,15)} = 20.58$, $p = 0.000$, $\eta_p^2 = 0.58$) on SD in both conditions. A significant decrease of the SD was observed after exercise for Pl (−20%) and CHO (−20%) conditions. Magnitude-based inferences showed the effect of exercise is most likely positive (100%, CI: −220/−105 ms) in both conditions. Furthermore, CHO ingestion has a likely positive effect (96%, −117/26 ms) on SD before sprints when compared to Pl.

No effect of nutritional supplementation and exercise was observed on tiredness (respectively $F_{(1,15)} = 0.00$, $p = 0.098$, $\eta_p^2 = 0.00$ and $F_{(1,15)} = 2.72$, $p = 0.012$, $\eta_p^2 = 0.15$). Magnitude-based inferences indicated that exercise has a likely positive effect (87%, CI: −12.5/0.5%) on tiredness (decrease), regardless of the nutritional supplementation used.

Results showed a main negative effect of exercise on errors ($F_{(1,16)} = 5.05$, $p = 0.004$, $\eta_p^2 = 0.240$) (increase of errors). No effect of nutritional supplementation was observed ($F_{(1,16)} = 1.78$, $p = 0.021$, $\eta_p^2 = 0.10$). Magnitude based inferences showed that the effect of exercise is likely negative (79%, CI: 0.2/3.9%) on accuracy in both conditions whereas CHO ingestion is likely negative (94%, CI: 0.2/2.2%) on accuracy when compared to Pl before sprints.

3.2.3. Go/Nogo

No effect from nutritional supplementation and exercise was observed on mean RT (respectively $F_{(1,16)} = 0.26$, $p = 0.062$, $\eta_p^2 = 0.02$ and $F_{(1,16)} = 0.14$, $p = 0.072$, $\eta_p^2 = 0.01$). Magnitude-based inferences showed that exercise has a likely positive effect (70%, CI: −43.8/8.2 ms). Furthermore, the effect of CHO ingestion is likely positive (82%, CI: −11.8/0.2) on RT compared with Pl condition during exercise.

No effect from nutritional supplementation and exercise was found on SD (respectively $F_{(1,16)} = 0.13$, $p = 0.072$, $\eta_p^2 = 0.01$ and $F_{(1,16)} = 0.19$, $p = 0.067$, $\eta_p^2 = 0.01$). Magnitude-based inferences showed that, when compared to Pl, CHO ingestion effect is likely negative (94%, CI: −6.1/17.9 ms) on SD pre-sprint and likely positive during exercise (84%, CI: −26.6/6.2 ms).

No effect from nutritional supplementation and exercise was observed on errors (respectively $F_{(1,16)} = 0.27$, $p = 0.061$, $\eta_p^2 = 0.02$ and $F_{(1,16)} = 2.63$, $p = 0.013$, $\eta_p^2 = 0.14$). Magnitude-based inferences showed that exercise has a likely positive effect (90%, CI: −2.6/0.7%) on accuracy on both conditions.

4. Discussion

The present study aimed to investigate the effect of CHO ingestion on muscular and cognitive performances using multiple sprints exercise with incomplete recovery (6 × 5 s sprints with 25 s of passive recovery). Using a qualitative approach [30], the present findings indicated that CHO ingestion enhances both sprint and cognitive performances. Carbohydrate supplementation increased maximal power output and reduced muscular tiredness compared to Pl ingestion. The results also demonstrated a positive effect of intermittent heavy exercise on all cognitive tasks, manifested by faster information processing and a better efficiency of attention/perception and inhibitory control processes. When compared to Pl, magnitude-based inferences showed that CHO ingestion induced a noticeable positive effect on SRT performances after exercise and on Go/Nogo and visual scanning performances during exercise.

In the scientific literature, few studies examined the effect of CHO ingestion on sprint performance. Moreover, it is difficult to interpret current results considering their disparity. The complex nature of intermittent sports as well as many methodological differences are most likely responsible for such discrepancy. The improvement in muscular performances observed in the present study argues in favor of an ergogenic effect of CHO, in line with previous results indicating an increase in maximal power output after CHO ingestion [16] or mouth rinse [31,32]. Lee et al. [16] have observed that CHO ingestion has a small but significant effect on repetition sprint exercise performance in female athletes during 10 sets of 5 × 4 s with 20 s recovery. More recent studies have used mouth rinsing to test the central nervous system hypothesis of CHO effect. For example, Beaven et al. [31] have reported an increase in power production during a repetition of 5 × 6-s cycling sprints interspersed with 24 s of active recovery in males cyclists. Recently, Philips et al. [32] have investigated the influence of serial administration of CHO mouth rinse on cycling performance, nausea scales and perceived exertion during a 30 s cycle sprint in physically active males. Using a qualitative approach, they reported a likely benefit of the CHO mouth rinse on maximal power output during a cycle sprint, especially during the first 5 s of the sprint, without any effects on fatigue index or perceived exertion. The present results confirm the positive effect of CHO supplementation on peak power and power maintenance among sprints on a highly trained population. In the field of elite sport, these findings open a new perspective on performance optimization strategy in order to cope with fatigue.

The second main finding of this study is the effect of CHO ingestion on cognitive functioning after a series of shorter but high intermittent exercises. It is now widely accepted that exercise has

a positive effect on cognitive performance and leads to increased arousal [33]. Exercise facilitates multiple cognitive performances and, under certain conditions, enhances responses speed and response accuracy, and facilitates cognitive processes. Most studies focused on the effects of moderate intensity exercise, but results on cognition during heavy exercise are fairly equivocal (for review see [34]). It appears that a positive effect is mainly observed after or during aerobic exercise with a minimum duration of approximately 20 to 60 min [33]. The hypothesis supporting these results is that exercise acts as a stressor that induces changes in arousal level and as a result impacts cognitive functioning. In the acute exercise-cognition interaction, the effect of exercise seems to be highly correlated with the plasma adrenaline (epinephrine) and noradrenaline (norepinephrine) threshold [35]. For example, it has been reported a link between a high-level of blood adrenaline that could be associated with changes in the central nervous system and improvement in cognitive performance [36]. More recently, Dietrich and Audiffren [23] proposed a neurocognitive model to account for the psychological consequences of acute exercise. This model called reticular-activating hypofrontality model, predicts that exercise engages arousal mechanisms in the reticular-activating system and disengages the higher-order functions of the prefrontal cortex with fatigue. However, this model is still matter of debate [37,38]. Recent studies suggest that cognitive control is extremely robust and appears not to be affected by the heavy exercise. For example, Davranche et al. [37] investigated whether workload intensity modulates exercise-induced effect on RT performances. Fourteen participants performed a Simon task while cycling 20 min at a light (first ventilatory threshold, VT − 20%), moderate (VT1) or very hard (VT + 20%) level of exercise. After 15 min of cycling, RT was faster than during the first 5 min of exercise, and any signs of worsening on RT or on accuracy have been reported during heavy exercise. More interestingly, the inhibitory control was fully efficient from the beginning to the end of exercise, regardless of the workload intensity. The results of the present study are in line with these findings, since a positive effect of exercise has been observed on response speed for SRT, visual scanning and Go/Nogo performances after sprint repetition, and suggest that a series of shorter heavy intermittent exercises could enhance cognitive functioning.

The effect of CHO supplementation on cognitive function during exercise has been occasionally assessed, but mainly during endurance exercise. Lieberman et al., 2002 [26] reported that administration of supplemental carbohydrate significantly enhances vigilance and mood during sustained physical activity and interspersed rest. Collardeau et al. [22] have shown that, when compared to placebo, drinking a 5.5% carbohydrate solution improves complex cognitive performance during a two-hour run performed at 75% VO_{2max} by well-trained triathletes. These studies suggest that there is an increase in resource allocation with CHO ingestion during prolonged exercise. Carbohydrate ingestion during exercise possibly leads to a decrease in mental load associated with the perception of effort (RPE) and consequently lead to a higher involvement in attentional resources during the sustained attention tasks [39]. Indeed the role of CHO ingestion on RPE has been widely studied and an improvement in RPE (lower scores) is classically reported.

There are limited data regarding the effect of CHO ingestion on cognitive function in intermittent sports and the results are conflicting. To date, Bottoms et al. [25] are the only authors who have reported an improvement in visual RT after CHO intake during short duration exercise performed by squash players. Despite the fact that their protocol is far closer to the demands of squash play than the present one, the present findings are in line and support the beneficial effect of CHO ingestion on sprint performance. Welsh et al. [17] and Winnick et al. [18] tested the effect of CHO ingestion with basketball players on an intermittent high-intensity protocol. The authors reported a benefit of CHO ingestion on exercise capacity, but no effects on attention and executive control (e.g., Stroop task) were found.

The present results showed that exercise improves cognitive performances. Furthermore, a positive additional effect of CHO ingestion has been found on information processing during the SRT task and on attention/perceptual performance during the visual scanning. However, no significant changes have been observed on inhibitory control during the Go/Nogo task. One specificity of our

design is that the SRT task was performed after sprint, at rest, contrary to VS and GNG which were assessed after sprints but during a cycling exercise. According to Lambourne and Tomporowski [33], deterioration of perceptual responses and SRT has been shown when cognitive tasks are performed in double task. The effect of double tasks (exercise + cognitive task) seems to be more important on simple reaction time than other cognitive tasks.

Two mechanisms have emerged to explain the ergogenic effect of CHO ingestion. The first mechanism, which appears during prolonged exercise lasting more than 1.5 h, is a metabolic effect of CHO oxidation when skeletal muscle and liver glycogen stores are a limiting factor [40]. For shorter exercise, lasting one hour or less, the explanatory mechanism is of central origin in response to exposure of CHO in the oral cavity. Considering the brief duration of the physical task used in this protocol, the facilitating effect cannot be explained by a metabolic effect. We assume that during ingestion, CHO may exert its effects on exercise through a central action, improving motor drive or motivation, mediated by receptors in the mouth or GI tract [40]. The mouth receptors that are sensitive to CHO could have activated specific brain areas, like the orbitofrontal cortex, and elicit beneficial effects on muscular and cognitive performances [10].

Numerous studies over the past decade emphasized the potential ergogenic effects of dietary constituents on cognitive performance (for review see [3]). In line with the present findings, it has been suggested that nutritional supplementation such as caffeine [41–43], guarana [44,45], tyrosine in a warm environment [46], branched-chain amino acids [47], and nitrate [48] could help to limit central fatigue and increase or maintain cognitive abilities. These findings open a new perspective in terms of performance optimization strategy to cope with fatigue in the field of elite sport. However, more studies are required to complement these results.

The main limitation of the present study is that participants took part in the study in a post-pradial state but no blood glucose baseline levels were measured before experimental session. The fact that the initial carbohydrate status of the athlete was not measured does not question the effects of CHO observed in this study, but makes the generalization of the present findings difficult. Indeed, the blood level of glucose is an important factor since CHO ingestion seems to have a greater impact on performance under circumstances eliciting hypoglycemia. The influence of a CHO intake on performance may be reduced when participants are fed [49,50], therefore the ergogenic effect of CHO ingestion may have been larger if participants had fasted longer than three hours. However several observations indicate that the nutritional status of participants prior testing is not a definitive regulator of the effect of carbohydrate. Whitham and McKinney [51] found no effect of CHO MR on 60-min time trial performance despite an overnight fast, whereas Pottier et al. [52] found a benefit when a high-CHO meal was ingested two hours prior to testing. While the present study involved a relatively small sample size due to the specificity of the population, future studies involving larger sample size are needed to confirm the present results and further elucidate the impact of CHO ingestion on cognitive performance specific to an intermittent sport model.

5. Conclusions

To summarize, the present data suggests that CHO ingestion enhances physical performance in high-level squash and fencing athletes during an intermittent high-intensity exercise, and has an additional positive effect on cognitive performances after exercise. Note that, the specificity of our high-level athletes can influence these results as it is generally assumed that attentional breadth continued to increase with higher physical exercise in contrast with non-athletes [53].

Acknowledgments: We thank all the subjects for participating to this study. Thank to Elliot Miller Henderson for the proofreading the final version of the manuscript.

Author Contributions: For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used Jeanick Brisswalter conceived and designed the experiments; Laura Pomportes performed the experiments; Laura Pomportes

and Jeanick Brisswalter analyzed the data; Arnaud Hays contributed reagents/materials/analysis tools; Laura Pomportes, Jeanick Brisswalter and Karen Davranche wrote the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Gordon, B.; Kohn, L.A.; Levine, S.A.; Matton, M.; Scriver, W.D.M.; Whiting, W.B. Sugar content of the blood in runners following a marathon race. *J. Am. Med. Assoc.* **1925**, *85*, 508–509. [CrossRef]
2. Jeukendrup, A.E.; Rollo, I.; Carter, J.M. Carbohydrate mouth rinse: Performance effects and mechanisms. *Sports Sci. Exch.* **2013**, *26*, 1–8.
3. Meeusen, R. Exercise, Nutrition and the Brain. *Sports Med.* **2014**, *44*, 47–56. [CrossRef] [PubMed]
4. Newsholme, E.A.; Acworth, I.N.; Blomstrand, E. Amino acids, brain neurotransmitters and a functional link between muscle and brain that is important in sustained exercise. *Adv. Myochem.* **1987**, *1*, 127–133.
5. Meeusen, R.; Watson, P.; Dvorak, J. The Brain and Fatigue: New Opportunities for Nutritional Interventions. *J. Sports Sci.* **2006**, *24*, 773–782. [CrossRef] [PubMed]
6. Jeukendrup, A.E. Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition* **2004**, *20*, 669–677. [CrossRef] [PubMed]
7. Phillips, S.M. Carbohydrate supplementation and prolonged intermittent high-intensity exercise in adolescents: Research findings, ethical issues and suggestions for the future. *Sports Med.* **2012**, *42*, 817–828. [CrossRef] [PubMed]
8. Baker, L.B.; Rollo, I.; Stein, K.W.; Jeukendrup, A.E. Acute Effects of Carbohydrate Supplementation on Intermittent Sports Performance. *Nutrients* **2015**, *7*, 5733–5763. [CrossRef] [PubMed]
9. Dorling, J.L.; Earnest, C.P. Effect of carbohydrate mouth rinsing on multiple sprint performance. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2013**, *10*. [CrossRef] [PubMed]
10. Rollo, I.; Homewood, G.; Williams, C.; Carter, J.; Goosey-Tolfrey, V.L. The influence of carbohydrate mouth rinse on self-selected intermittent running performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2015**, *25*, 550–558. [CrossRef] [PubMed]
11. Gant, N.; Stinear, C.M.; Byblow, W.D. Carbohydrate in the mouth immediately facilitates motor output. *Brain Res.* **2010**, *1350*, 151–158. [CrossRef] [PubMed]
12. De Pauw, K.; Roelands, B.; Knaepen, K.; Polfliet, M.; Stiens, J.; Meeusen, R. Effects of caffeine and maltodextrin mouth rinsing on P300. *J. Appl. Physiol.* **2015**, *118*, 776–782. [CrossRef] [PubMed]
13. Chambers, E.S.; Bridge, M.W.; Jones, D.A. Carbohydrate sensing in the human mouth: Effects on exercise performance and brain activity. *J. Physiol.* **2009**, *587*, 1770–1794. [CrossRef] [PubMed]
14. Turner, C.E.; Byblow, W.D.; Stinear, C.M.; Gant, N. Carbohydrate in the mouth enhances activation of brain circuitry involved in motor performance and sensory perception. *Appetite* **2014**, *80*, 212–219. [CrossRef] [PubMed]
15. Ali, A.; Williams, C.; Nicholas, C.W.; Foskett, A. The influence of carbohydrate-electrolyte ingestion on soccer skill performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 1969–1976. [CrossRef] [PubMed]
16. Lee, C.L.; Cheng, C.F.; Astorino, T.A.; Lee, C.J.; Huang, H.W.; Chang, W.D. Effects of carbohydrate combined with caffeine on repeated sprint cycling and agility performance in female athletes. *Int. Soc. Sports Nutr.* **2014**, *1*, 11–17. [CrossRef] [PubMed]
17. Welsh, R.S.; Davis, J.M.; Burke, J.R.; Williams, H.G. Carbohydrates and physical/mental performance during intermittent exercise to fatigue. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2002**, *34*, 723–731. [CrossRef] [PubMed]
18. Winnick, J.J.; Davis, J.M.; Welsh, R.S.; Carmichael, M.D.; Murphy, E.A.; Blackmon, J.A. Carbohydrate feedings during team sport exercise preserve physical and cns function. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2005**, *37*, 306–315. [CrossRef] [PubMed]
19. Delignières, D.; Brisswalter, J.; Legros, P. Influence of physical exercise on choice reaction time in sport experts: The mediating role of resource allocation. *J. Hum. Mov. Stud.* **1994**, *27*, 173–188.
20. Etnier, J.L.; Salazar, W.; Landers, D.M.; Petruzzello, S.J.; Han, M.; Nowell, P. The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta- analysis. *J. Sport Exerc. Psychol.* **1997**, *19*, 249–277. [CrossRef]
21. Brisswalter, J.; Collardeau, M.; René, A. Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Med.* **2002**, *32*, 555–566. [CrossRef] [PubMed]

22. Collardeau, M.; Brisswalter, J.; Vercruyssen, F.; Audiffren, M.; Goubault, C. Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate availability. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2001**, *86*, 150–156. [PubMed]
23. Dietrich, A.; Audiffren, M. The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **2011**, *35*, 1305–1325. [CrossRef] [PubMed]
24. Baker, L.B.; Nuccio, R.P.; Jeukendrup, A.E. Acute effects of dietary constituents on motor skill and cognitive performance in athletes. *Nutr. Rev.* **2014**, *72*, 790–802. [CrossRef] [PubMed]
25. Bottoms, L.M.; Hunter, A.M.; Golloway, S.D.R. Effects of carbohydrate ingestion on skill maintenance in squash players. *Eur. J. Sport Sci.* **2006**, *6*, 187–195. [CrossRef]
26. Lieberman, H.R.; Falco, C.M.; Slade, S.S. Carbohydrate administration during a day of sustained aerobic activity improves vigilance, as assessed by a novel ambulatory monitoring device, and mood. *Am. J. Clin. Nutr.* **2002**, *76*, 120–127. [PubMed]
27. Utter, A.C.; Kang, J.; Nieman, D.C.; Williams, F.; Robertson, R.J.; Henson, D.A.; Davis, J.M.; Butterworth, D.E. Effect of carbohydrate ingestion and hormonal responses on ratings of perceived exertion during prolonged cycling and running. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1999**, *80*, 92–99. [CrossRef] [PubMed]
28. Léger, L.; Boucher, R. An indirect continuous running multistage field test: The Université de Montréal track test. *Can. J. Appl. Sport Sci.* **1980**, *5*, 77–84. [PubMed]
29. Driller, M.W.; Christos, K.A.; Cecilia, M.S. The Reliability of a 30-s Sprint Test on the Wattbike Cycle Ergometer. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2013**, *8*, 379–383. [CrossRef] [PubMed]
30. Hopkins, W.G.; Marshall, S.W.; Batterham, A.M.; Hanin, J. Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2009**, *41*, 3–13. [CrossRef] [PubMed]
31. Beaven, C.M.; Maulder, P.; Pooley, A.; Kilduff, L.; Cook, C. Effects of caffeine and carbohydrate mouth rinses on repeated sprint performance. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2013**, *38*, 633–637. [CrossRef] [PubMed]
32. Phillips, S.M.; Findlay, S.; Kavaliauskas, M.; Grant, M.C. The Influence of Serial Carbohydrate Mouth Rinsing on Power Output during a Cycle Sprint. *J. Sports Sci. Med.* **2014**, *13*, 252–258. [PubMed]
33. Lambourne, K.; Tomporowski, P. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A meta-regression analysis. *Brain Res.* **2010**, *134*, 12–24. [CrossRef] [PubMed]
34. McMorris, T. History of research into the acute exercise-cognition interaction: A cognitive psychology approach. In *Exercise-Cognition Interaction: Neuroscience Perspectives*; McMorris, T., Ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 2016; pp. 1–28.
35. Podolin, D.A.; Munger, P.A.; Mazzeo, R.S. Plasma catecholamine and lactate response during graded exercise with varied glycogen conditions. *J. Appl. Physiol.* **1991**, *71*, 1427–1433. [PubMed]
36. Chmura, J.; Nazar, K.; Kaciuba-Uscilko, H. Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds. *Int. J. Sports Med.* **1994**, *15*, 172–176. [CrossRef] [PubMed]
37. Davranche, K.; Brisswalter, J.; Radel, R. Where are the limits of the exercise intensity on cognitive control? *J. Sport Health Sci.* **2015**, *4*, 56–63. [CrossRef]
38. Schmit, C.; Davranche, K.; Easthope, C.S.; Colson, S.S.; Brisswalter, J.; Radel, R. Pushing to the limits: The dynamics of cognitive control during exhausting exercise. *Neuropsychologia* **2015**, *68*, 71–81. [CrossRef] [PubMed]
39. Cermak, N.M.; Van Loon, J.C. The Use of Carbohydrates during Exercise as an Ergogenic Aid. *Sports Med.* **2013**, *43*, 1139–1155. [CrossRef] [PubMed]
40. Carter, J.M.; Jeukendrup, A.E.; Jones, D.A. The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2004**, *36*, 2107–2111. [CrossRef] [PubMed]
41. Glade, M.J. Caffeine-Not just a stimulant. *Nutrition* **2010**, *26*, 932–938. [CrossRef] [PubMed]
42. Hogervorst, E.; Bandelow, S.; Schmitt, J.; Jentjens, R.; Oliveira, M.; Allgrove, J.; Carter, T.; Gleeson, M. Caffeine Improves Physical and Cognitive Performance during Exhausting Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 1841–1851. [CrossRef] [PubMed]
43. Santos, V.G.; Santos, V.R.; Felippe, L.J.; Almeida, J.W., Jr.; Bertuzzi, R.; Kiss, M.A.; Lima-Silva, A.E. Caffeine reduces reaction time and improves performance in simulated-contest of taekwondo. *Nutrients* **2014**, *6*, 637–649. [CrossRef] [PubMed]

44. Veasey, R.C.; Haskell-Ramsay, C.F.; Kennedy, D.O.; Wishart, K.; Maggini, S.; Fuchs, C.J.; Stevenson, E.J. The Effects of Supplementation with a Vitamin and Mineral Complex with Guaraná Prior to Fasted Exercise on Affect, Exertion, Cognitive Performance, and Substrate Metabolism: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **2015**, *7*, 6109–6127. [CrossRef] [PubMed]
45. Pomportes, L.; Davranche, K.; Brisswalter, I.; Hays, A.; Brisswalter, J. Heart Rate Variability and Cognitive Function Following a Multi-Vitamin and Mineral Supplementation with Added Guarana (*Paullinia cupana*). *Nutrients* **2015**, *7*, 196–208. [CrossRef] [PubMed]
46. Coull, N.A.; Watkins, S.L.; Aldous, J.W.; Warren, L.K.; Chrismas, B.C.; Dascombe, B.; Mauger, A.R.; Abt, G.; Taylor, L. Effect of tyrosine ingestion on cognitive and physical performance utilising an intermittent soccer performance test (iSPT) in a warm environment. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2015**, *115*, 373–386. [CrossRef] [PubMed]
47. Fernstrom, J.J. Branched-Chain Amino Acids and Brain Function. *J. Nutr.* **2005**, *135*, 1539–1546.
48. Thompson, C.; Wylie, L.J.; Fulford, J.; Kelly, J.; Black, M.I.; McDonagh, S.T.J.; Jeukendrup, A.E.; Vanhatalo, A.; Jones, A.M. Dietary nitrate improves sprint performance and cognitive function during prolonged intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2015**, *115*, 1825–1834. [CrossRef] [PubMed]
49. Beelen, M.; Berghuis, J.; Bonaparte, B.; Ballak, S.B.; Jeukendrup, A.E.; van Loon, L.J. Carbohydrate mouth rinsing in the fed state: Lack of enhancement of time-trial performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2009**, *19*, 400–409. [CrossRef] [PubMed]
50. Fares, E.J.; Kayser, B. Carbohydrate mouth rinse effects on exercise capacity in pre-and postprandial States. *J. Nutr. Metab.* **2011**. [CrossRef] [PubMed]
51. Whitham, M.; McKinney, J. Effect of a carbohydrate mouthwash on running time-trial performance. *J. Sports Sci.* **2007**, *25*, 1385–1392. [CrossRef] [PubMed]
52. Pottier, A.; Bouckaert, J.; Gilis, W.; Roels, T.; Derave, W. Mouth rinse but not ingestion of a carbohydrate solution improves 1-h cycle time trial performance. *Med. Sci. Sports* **2010**, *20*, 105–111. [CrossRef] [PubMed]
53. Hüttermann, S.; Memmert, D. Does the inverted-U function disappear in expert athletes? An analyses of attentional behavior under physical exercise of athletes and non-athletes. *Physiol. Behav.* **2014**, *131*, 87–92. [CrossRef] [PubMed]

© 2016 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Etude n°4 : Amélioration de la performance cognitive induite par l'utilisation de caféine, d'hydrates de carbone et de guarana en rinçage de bouche pendant un exercice de pédalage sous-maximal

L'analyse de la littérature scientifique actuelle suggère que l'utilisation de caféine et d'hydrates de carbone en rinçage de bouche a le potentiel d'améliorer la performance physique lors d'exercices aérobies de durées inférieures à 1 heure. Bien que cela ait été très peu investigué, il a aussi été suggéré que la caféine en rinçage de bouche a un effet bénéfique *probable* sur le contrôle de l'interférence au repos. En revanche aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de ces composés en rinçage de bouche sur la performance cognitive au cours de l'exercice.

A ce titre, l'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet de plusieurs rinçages de bouche composés d'hydrates de carbone, de caféine et de guarana sur le traitement de l'information sensorimotrice, le contrôle de l'interférence ainsi que sur le traitement temporel au cours d'un exercice de pédalage sous-maximal de 40 minutes.

Vingt-quatre sujets (8 femmes, 16 hommes) physiquement actifs ont réalisé 4 sessions expérimentales réparties sur 2 semaines. Chaque session était rigoureusement similaire avec pour seule différence le type de supplémentation utilisée en rinçage de bouche. Au cours d'un exercice de pédalage sous-maximal (60% PMA), 3 rinçages de bouches de 25 ml, d'une durée de 20 secondes et composés de caféine (CAF) (67,5 mg), d'hydrates de carbone (CHO) (fructose, maltodextrine, 6%), d'un complexe de guarana multi-vitaminé (GUAc) (37,5 mg) ou d'un placebo (PL) étaient réalisés avant le départ puis à 13 et 26 minutes d'exercice. Simultanément à

l'exercice de pédalage, les sujets devaient réaliser 3 blocs de 13 minutes constitués d'une tâche de conflit (tâche de Simon) ainsi qu'une tâche de production de durée. La tâche de Simon est une mesure du contrôle inhibiteur sélectif, pouvant être défini comme l'inhibition de l'activation d'une réponse considérée comme non pertinente, au profit de l'activation d'une réponse considérée comme pertinente. Cette tâche présente l'avantage, comparée à la tâche de Go/Nogo préalablement utilisée, de donner un indice chronométrique précis (TR) de la durée des mécanismes mis en jeu lors de conflits. La tâche de production de durée permet quant à elle de mesurer l'efficacité du traitement temporel et d'évaluer de façon indirecte des variations du niveau d'éveil.

Les résultats indiquent que la condition CAF a un effet bénéfique *probable* sur le contrôle de l'interférence comparé au PL (93%). De plus, les 3 supplémentations nutritionnelles entraînent une surestimation temporelle *probable* (CHO : 80% ; CAF : 86% ; GUAc : 81%) et une diminution de la variabilité *probable* (CHO : 93% ; CAF : 89% ; GUAc : 92%), respectivement interprétées comme une augmentation du niveau d'éveil et une amélioration des processus attentionnels. En revanche, seuls les CHO entraînent une diminution *probable* du RPE comparé au PL (87%).

De façon additionnelle, nos résultats indiquent que l'exercice entraîne plusieurs adaptations cognitives. Une diminution significative du TR ainsi qu'une diminution tendancielle des erreurs, interprétées comme une amélioration du traitement de l'information, sont indiquées dès 26 minutes d'exercice (TR B1 vs B3 : +3%, Δ = 10 ms; erreurs B1 vs B3 : -1%). De plus, nos résultats révèlent aussi une surestimation temporelle dès 15 minutes d'exercice, qui se traduit par une diminution

de la durée moyenne produite (B1 vs B2 : -5%, Δ = 61 ms) ainsi qu'une diminution de la variabilité dès 26 minutes d'exercice (B1 vs B3 : -10%, Δ = 20 ms).

Pomportes, L., Brisswalter, J., Casini, L., Hays, A., Davranche, K. Cognitive performance enhancement induced by caffeine, carbohydrate and guarana mouth rinsing during submaximal exercise. *Nutrients.* 2017 Jun 9;9(6). doi: 10.3390/nu9060589.

nutrients

MDPI

Article

Cognitive Performance Enhancement Induced by Caffeine, Carbohydrate and Guarana Mouth Rinsing during Submaximal Exercise

Laura Pomportes [1,2], Jeanick Brisswalter [1], Laurence Casini [3], Arnaud Hays [4] and Karen Davranche [5,*]

1 Laboratoire Motricité Humaine Expertise Sport Santé, Université Nice Sophia Antipolis, 06205 Nice, France; laurapomportes@hotmail.fr (L.P.); brisswalter@unice.fr (J.B.)
2 CREPS PACA, 13080 Aix-en-Provence, France
3 Laboratoire de Neurosciences Cognitives, Aix-Marseille Université, CNRS, LNC, 13331 Marseille, France; laurence.casini@univ-amu.fr
4 Institut des Sciences du Mouvement, Aix-Marseille Université, UMR 7287, 13288 Marseille, France; arnaud.hays@gmail.com
5 Laboratoire de Psychologie Cognitive, Aix-Marseille Université, CNRS, LPC, 13331 Marseille, France
* Correspondence: karen.davranche@univ-amu.fr; Tel.: +33-(0)4-13-55-11-35

Received: 20 April 2017; Accepted: 6 June 2017; Published: 9 June 2017

Abstract: The aim of this study was to investigate the influence of serial mouth rinsing (MR) with nutritional supplements on cognitive performance (i.e., cognitive control and time perception) during a 40-min submaximal exercise. Twenty-four participants completed 4 counterbalanced experimental sessions, during which they performed MR with either placebo (PL), carbohydrate (CHO: 1.6 g/25 mL), guarana complex (GUAc: 0.4 g/25 mL) or caffeine (CAF: 67 mg/25 mL) before and twice during exercise. The present study provided some important new insights regarding the specific changes in cognitive performance induced by nutritional supplements. The main results were: (1) CHO, CAF and GUA MR likely led participants to improve temporal performance; (2) CAF MR likely improved cognitive control; and (3) CHO MR led to a likely decrease in subjective perception of effort at the end of the exercise compared to PL, GUA and CAF. Moreover, results have shown that performing 40-min submaximal exercise enhances information processing in terms of both speed and accuracy, improves temporal performance and does not alter cognitive control. The present study opens up new perspectives regarding the use of MR to optimize cognitive performance during physical exercise.

Keywords: nutrition; cognition; perceived exertion; mouth rinse; time-perception task; conflict task

1. Introduction

Several nutritional supplements are known to possess ergogenic effects on endurance performance (for review, see Reference [1,2]). The most largely studied are carbohydrate (CHO) and caffeine (CAF) assumed to help in limiting fatigue [3–6]. Both supplements have been shown to improve endurance capacity (exercise ≥ 2 h) but most likely utilizing two different mechanisms of action. After ingestion, CAF, which is thought to act as a central stimulant, is rapidly distributed to all tissues and readily crosses the blood-brain barrier to exert its ergogenic effects on the central nervous system mediated by the antagonism of adenosine receptors, which induces higher dopamine concentrations in the brain [7]. For CHO ingestion, the mechanism behind the ergogenic effect is rather a metabolic response, which would allow for maintaining plasma glucose concentration and high rates of CHO oxidation [8]. However, some studies have also shown that CHO supplementation can improve performance for high intensity exercises (>75% of maximal oxygen uptake (VO_{2max}))

lasting 1 h or less [9,10]. These effects are difficult to explain by a metabolic hypothesis since CHO availability is not a limiting factor during the first hour of exercise [10]. Furthermore, Carter et al. [9] found that rinsing the mouth with a non-sweet maltodextrin solution significantly reduced the time to complete a 1-h cycle time trial. For the authors, the benefit observed could be the result of a central effect leading to the improvement of the motor drive or motivation, possibly due to the activation of receptors inside the mouth.

These ergogenic effects observed after mouth rinsing (MR) with nutritional supplements open up new perspectives in terms of performance optimization strategies. The fact that similar magnitude benefits have been observed on performance using MR or ingestion [11] incites to investigate thoroughly to define potential benefits and gainful usage, for example with athletes who are inclined to gastro-intestinal distress or when they need to limit energy intake (weight control). Studies using CHO MR [11–16] have generally reported exercise performance improvement (for review, see [17]), whereas results of the few studies assessing the effect of CAF MR remain inconclusive [12,18]. Concerning CHO MR, the main hypothesis for explaining the ergogenic effect relies upon the link between sweet tastants receptors T1Rs in the oral cavity and esophagus as well as various brain regions [19]. Supporting this idea, it has been observed that the sole presence of CHO in the mouth, prior to its ingestion, induced an increase in corticomotor pathway excitability [20]. Besides these effects in motor areas, an increase in brain activity of some areas (i.e., the dorsolateral prefrontal cortex, the orbitofrontal cortex and the striatum), known to be involved in attention and reward, has also been observed after MR [13,21]. Because of the key-role of these brain areas in executive functions, performance in cognitive tasks could also be influenced; this needs to be further investigated.

As regards to CAF MR, the rate of caffeine buccal absorption is extremely rapid and leads to a comparable amount of caffeine in the systemic circulation compared to ingestion [22]. Only very few data are available about the influence of CAF MR on cognitive performance, however it has been recently reported that CAF MR would exert a likely beneficial effect on reaction time (RT) in a task requiring executive control (Stroop task) [21]. By using electroencephalogram signal analysis, the same authors further explored this issue by assessing the effect of 20 s nasal spray with placebo, glucose and CAF on performance in the same cognitive task. While behavioral data reported no effect of nasal spray, electrophysiological data indicated that glucose and CAF nasal spray increased brain activity in some areas known to be engaged in cognitive control [23]. These brain responses could be due to the activation of bitter taste receptors T2Rs respectively in the mouth and the nasal cavity [20,21]. Further studies are required to understand the ergogenic effect of MR on exercise performance and furthermore on cognitive performance.

The influence of nutritional supplements MR during exercise has also been investigated by measuring the rate of perceived exertion (RPE). The RPE could be defined as "the feeling of how hard, heavy and strenuous a physical task is" [24]. Results are mixed but some studies reported that CAF and/or CHO MR lead to a decrease in RPE for the same power output [25–27] which suggests that CHO and CAF MR may induce a decrease in subjective perception of effort, allowing participants to produce more power with the same degree of discomfort. Therefore, for all of these reasons, the ergogenic effect of nutritional substances is a topic of interest for the optimization of sport performance.

Currently, there is a growing interest for guarana (GUA), which is often attributed to CAF content depending on how the extract is prepared [28]. In addition to CAF, guarana seeds are known to harbor a number of other possible stimulants such as flavonoids [29] or other potentially psychoactive components, including saponins and tannins [30,31], which could enhance cognitive function [32–34]. In several studies as well as in sports nutrition strategy, GUA is rarely used alone but mostly associated to multivitamins mineral complex [32,34,35] or to ginseng [33]. We assume that, in addition to the presence of CAF, the other components of guarana seeds could potentially enhance performance via the activation of bitter taste receptors T2Rs [36] or different pathways. Some recent studies have reported that GUA ingestion could also influence cognitive abilities. More specifically, it has been reported that ingestion of GUA, could, at rest, induce an improvement in

decision-making and alertness [32], improve memory performance [33] and reduce RPE after 30 min of submaximal exercise [34].

To the best of our knowledge, no studies have investigated the effect of MR on cognitive performance during exercise. In the field of physical activity, athletes are faced with strong physiological and cognitive demands to attain goals. Thus, the use of nutritional supplementation may ameliorate or aid to maintain a high performance and avoid adverse consequences on the outcome of sporting events. Consequently, this study aims to investigate the influence of serial administration of CHO, CAF and GUA MR on cognitive processes during an acute bout of 40-min of exercise. This exercise duration/intensity was chosen to be both appropriate to participants regularly engaged in training and enough intense to theoretically induced performance impairment (for a review see Reference [37]). Potential effects of nutritional supplements are thus expected either in terms of maintaining performance (if any impairment occurred) or ergogenic effect.

In the present study, we investigated executive functions, which in a broad sense refer to a number of processes that are necessary to remain adapted to an ever-changing environment. More specifically, we focused on cognitive control and time estimation, continuously involved in any goal-oriented behavior and we chose two well-established cognitive tasks, respectively a Simon task and a duration-production task. The Simon task [38] provides information about the ability to inhibit prepotent responses and the temporal task allows you to dissociate the effect on arousal and attention levels [39], two processes that usually remain amalgamated in most studies. The main purpose of the study was to assess whether these cognitive processes would be impacted during exercise by three different nutritional supplements commonly used by athletes and delivered by MR: CHO, CAF and guarana complex (GUAc: GUA + ginseng + vitamins C). Since results of recent studies have suggested that MR could increase brain activity in several areas that have a key-role in executive functions, we assume that both cognitive processes could benefit from supplementation during exercise.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

Twenty-four physically active participants (16 males and 6 females), recruited from a regional training sport center participated in this experiment without being paid (Table 1). All participants were regularly engaged in training (between 3 and 8 h per week) but were not professional cyclists. Participants were not used to drinking nutritional supplementations during training or competition and consumed less than 200 mg of caffeine per day. Before inclusion, the experimental procedure was explained to the participants and they signed an informed consent form approved by the University Ethics Committee (Ile de France, VII, Saint Germain en Laye, France).

Table 1. Anthropometrical and physiological characteristics of participants.

Mean (Standard Deviation)			
Variables	**All**	**Female**	**Male**
Sample size	24	8	16
Age (years)	26 (8)	30 (10)	24 (6)
Height (cm)	174 (10)	164 (7)	179 (7)
Body mass (kg)	72 (14)	57 (7)	79 (11)
Body mass index ($kg \cdot m^{-2}$)	23 (3)	21 (2)	25 (3)
Peak power output (W)	250 (58)	198 (31)	276 (50)
Cycling intensity experimental sessions (W)	150 (35)	119 (18)	166 (30)
Heart rate max ($bpm \cdot min^{-1}$)	189 (8)	185 (10)	190 (7)

2.2. Procedure

This study used a cross over design and required the participants to visit the laboratory six times (one preliminary session, one training session and four experimental sessions) at least 72 h apart and at the same time of day.

2.2.1. Preliminary Session

One week before the start of the first experimental session, preliminary testing was performed to collect anthropometric and physiological characteristics. After a standardized warm up, the peak power output was assessed on the cycle ergometer (Cyclus 2®, RBM, Leipzig, Germany) using a progressive test starting at 80 Watt (W) for females and 100 W for males with an increase of 15 W/min until exhaustion. The last completed step was regarded as the peak power output (W). During the test, heart rate (HR) was continuously recorded using a monitor (RS800, Polar®, Helsinki, Finlande) which allows for HRmax assessment (Table 1).

2.2.2. Training Session

Between 48 and 72 h prior to the first experimental session, participants underwent a training session with the duration-production task and the Simon task. Details are provided in the cognitive tasks section.

2.2.3. Experimental Design

Each participant performed four experimental sessions, two per week, separated by at least 72 h and conducted at the same time of the day. Participants were instructed to keep a food diary during the two days prior to the first session and to replicate this diet before each session. They were also required to refrain from alcohol, caffeine, pain medication and nutritional supplements during the 48 h prior to each session. The last meal was taken 3 h and half prior to the start of each experimental session suggesting that participants had 3 h of fast between each session. No food or drinks intake (except water) was allowed between the last meal and the experimental session. The participants were instructed to control their time and hours of sleep the two nights preceding each experimental session. Participants were required to maintain the same training program every week during the experimental protocol.

Each experimental session (see Figure 1), corresponding to a different tested nutritional mouth rinse, started with a specific cycling warm-up consisting of 2 × (2 min 100 W (for males)/80 W (for females) + 2 min 150 W (for males)/130 W (for females) and 3 × (30 s 200 W (for males)/170 W (for females) + 30 s 50 W) and lasting approximately 10 min [40]. Immediately after the warm-up, keeping the seated position on the cycle ergometer, the participants performed a short recall of the two cognitive tasks. The recall was identical to the training session except that the participants could only perform one block of training while cycling. Once the recall was made, the first mouth rinse (MR1) was administered during 20 s. Then, the cycling exercise started with a resistance fixed at 60% of the peak power output which was previously recorded for each participant. After one minute of cycling, each participant performed three identical experimental blocks separated by 20 s of MR during which they continued to cycle. Following MR2 and MR3 participants were allowed to rehydrate with as much tap water as they required. During each block, participants performed the duration-production task lasting about three minutes and seven minutes later the Simon task also lasting about three minutes. Finally, at the end of the 40-min exercise, the participants had to fill a visual analogic scale to assess RPE. Pedaling rate was freely chosen and heart rate was recorded throughout the 40 min cycling exercise using a polar RS800 cardiofrequencemeter (Polar Electro, Kempele, Finland).

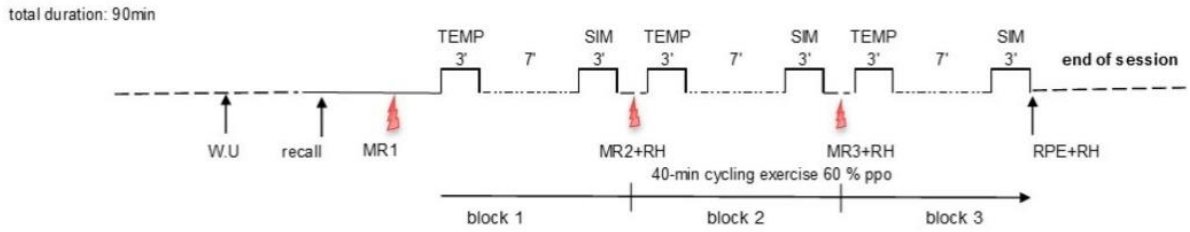

Figure 1. General procedure of each experimental session. (WU = Warm Up; Recall = Cognitive tasks recall; TEMP = Duration Production task; SIM = Simon task; MR = mouth rinsing; RH = Rehydration; ppo = peak power output; RPE = Rating of Perceived Exertion).

Each one of the three 25 mL-MR consisted of either a 7% carbohydrate complex (CHO: fructose (89%) and maltodextrin (11%), ISOXAN® Sport Pro, NHS, Rungis, France), a 67 mg caffeine (CAF, PROLAB® nutrition, Chatswoth, USA) added with orange sugarless syrup, a 0.4 g guarana complex (GUA: 37.5 mg of guarana + 12.5 mg ginseng + 22.5 mg vitamins C, Isoxan Actiflash® Booster, Menarini, NHS, Rungis, France), or a placebo (PL: tap water added with orange sugarless syrup) depending on the experimental session. We decided to use the amount of 7% CHO commonly used in nutrition studies and 67 mg caffeine and 37.5 mg guarana for each MR to reach the dose range of 200 mg caffeine and 300 mg guarana recommended per day.

The study was single-blind and experimental sessions were counterbalanced between participants. Each block lasted about 13 min and each session lasted about 90 min while completing the cognitive tasks for about half total time.

2.3. Cognitive Tasks

The cognitive tasks were performed on a cycle ergometer, equipped with two thumb response keys fixed on the top of the right and left handle grips, positioned in front of a screen located 1m away. The cognitive tasks were first performed at rest during both the training and the recall sessions and afterward during the 40-min cycling exercise at 60% of peak power output.

2.3.1. Duration-Production Task

The duration-production task consists of pressing a button for a time interval learned during a training phase. The procedure used here was inspired from duration-production tasks used in previous studies [39,41].

Duration-Production Training and Recall Sessions

The training session consisted of two parts. For the first ten trials, a 600 Hz tone sounded for 1100 ms. When the sound ended, a red circle appeared in the center of the screen indicating that participants could reproduce the duration of the sound by pressing the right keypress as long as the sound lasted. When the participants released the keypress, an auditory feedback was delivered. Five different feedbacks were used. If the produced interval was correct (less than 7.5% longer or shorter than the target), the feedback "correct" was delivered. If the produced duration was too long or too short (7.5–22.5% longer or shorter than the target), either the word "too long" or "too short" were delivered. If the duration was excessively long or short (more than 22.5% longer or shorter), the words "much too long" or "much too short" were delivered. After the first ten trials, participants performed a second block in which no additional model of target duration was delivered. During the remaining trials, once the red circle appeared on the screen, participants pressed the key for 1100 ms. As in the ten first trials, an auditory feedback was delivered after each response. The participants continued until they produced 12 correct durations through 15 successive trials. A maximum of 50 trials was presented. If participants did not reach the criterion before the end of the block, they began a complete training session again (10 trials with the sound as the target duration followed by the remaining trials without the sound).

The recall session was identical to the training session except that the participants could only perform one block of training while cycling. A recall session was performed prior to each experimental session.

Duration-Production Experimental Sessions

During the experimental sessions, participants were required to press the right keypress for 1100 ms. Trial onset was initiated by participants once the red circle appeared on the screen. Participants had to maintain the keypress as long as necessary to time the required duration (1100 ms). No feedback on performance was given. One and a half seconds after the release of the key, the red circle appeared again, indicating that the next trial could be initiated.

The duration-production task was performed after 60 s, 14 min and 27 min of cycling exercise and lasted approximately 3 min for each block.

2.3.2. Simon Task

Simon Training and Recall Sessions

In the training phase of the Simon task, all participants performed a minimum of 3 blocks of 64 trials. Two additional blocks were performed, if necessary, until the following learning criteria were achieved in one block: (a) intra-block RT variability below 5%; (b) inter-blocks RT variability with the previous block below 5%; (c) mean RT less than 400 ms; and (d) error rate between 3% and 10%.

A short recall including 12 trials was performed at the beginning of each experimental session while cycling. No learning criterion was used.

Simon Task Experimental Sessions

During the whole trial, the participants had to fixate on a white point located in the center of the screen and they were required to respond, as quickly and accurately as possible, by pressing the appropriate response key (with the right or left thumb finger) according to the shape (square or circle) of a geometric symbol delivered either to the left or to the right of the fixation point. The distance from the center of the white fixation point to the center of the geometric symbol located to either the right or left was 7.5 cm. Participants had to respond according to the shape of the symbol while ignoring its spatial location. The mapping of geometric symbol shape to response key (for example, right response for a square and left response for a circle) was counterbalanced across participants. The task included two equiprobable trial types randomized: the congruent trials (CO) (response side ipsilateral to stimulus side), and the incongruent trials (IN) (response side contralateral to the stimulus side). As soon as a response key was pressed or when a delay of 1.5 s after the stimulus onset had elapsed without a response, the stimulus was removed from the screen and the next trial began. The Simon task, consisting of 64 trials, was carried out at 10 min 30 s, 23 min 30 s and 36 min 30 s during the cycling exercise.

2.4. Rating of Perceived Exertion (RPE)

A Visual Analogic Scale (VAS) has been chosen since it showed a good reproducibility and sensitivity to assess the subjective effort during exercise [42]. The scale was used under the form of a vertical line, 20 cm of length, anchored by word descriptors on the top (maximal exertion) and on the bottom (no exertion at all) to gauge how hard was the exercise. At the end of the experimental session, participants marked a point on the line that they felt represented the intensity of exercise at the end of the cycling session. The VAS score was determined by the distance in centimeters from the bottom line to the point marked by the participants.

2.5. Statistical Analysis

Results were analyzed with quantitative (General Linear Models, GLM) or qualitative (probabilistic magnitude-based inferences) methods. Firstly, repeated measures within participants GLM were performed on each dependent variable for exercise effect (mean RT, error rate, mean

produced duration, temporal variance) and post-hoc Newman-Keuls analyses were conducted for all significant effects. Significance was set at $p < 0.05$ for all analyses. Effect sizes for GLM were calculated using partial eta square (η_p^2). Secondly, to specifically test effects of nutritional supplements and RPE, we also reported probabilistic magnitude-based inferences about all the variables using methods described by Hopkins et al. [43] which has been applied in several recent nutritional studies [21,44,45]. Data were log-transformed prior to analyses to reduce bias arising from non-uniformity of error. To compare within-trial changes between trials, we used a modified statistical spreadsheet that calculates the between-trials differences or effect sizes (ES), 90% confidence interval (CI) using the pooled standard deviation. If the chance of benefit or harm were both >5% the true effect was reported as unclear. Otherwise, chances of benefit or harm were assessed as follows: <1%, almost certainly not; 1–5%, very unlikely; 5–25% unlikely; 25–75% possible; 75–95% likely; 95–99% very likely; >99% most likely [46].

3. Results

The two cognitive tasks were assessed during a 40-min cycling exercise at 60% of peak power output. Heart rate during exercise increased to 78% ± 1.2% HRmax in block 1, 82.3% ± 1.3% HRmax in block 2 and 83.8% ± 1.2% HRmax in block 3.

3.1. Cognitive Performance

An overview of cognitive results is shown in Table 2.

3.1.1. Duration-Production Task

Mean produced duration, measuring the accuracy and variance of produced durations, were calculated for each participant in each of the four conditions. Mean produced duration reflects overall lengthening or shortening of produced time. To aid in the interpretation of results, it should be noted that a shortening of produced durations (also called underproduction) means that the criterion value corresponding to the duration learned during the training session was reached earlier. Conversely, a lengthening of produced durations (also called overproduction) means that the criterion value was reached later [41]. The variance of produced durations provides information about individual participant's variability across trials. The mean and the variance of the produced duration were submitted to separate GLM with block (block 1, block 2 and block 3) as within-subject factors and to magnitude-based inferences for the effects of nutritional supplements.

Mean in Temporal Production

A significant effect of block was observed on mean produced duration ($F(2, 44) = 7.6$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.26$). Participants produced shorter durations in blocks 2 and 3 than in block 1 (respectively $p = 0.003$ and $p = 0.003$) (Figure 2a). Thus, although participants globally overproduced the target 1100 ms duration, they underproduced duration when completing the cycling exercise.

Nonetheless, magnitude based inferences showed that CHO, CAF and GUAc MR compared to PL lead to a likely decrease on mean produced durations (respectively 80%, 86% and 81%), which would mean that participants globally underproduced duration after MR with CHO, CAF and GUAc when compared with PL (Figure 2b).

Table 2. Cognitive performance as a function of nutritional supplementation and exercise.

			Duration Production Task Mean (Standard Errors)		Simon Task Mean (Standard Errors)							
			Produced Duration (ms)	Variance (ms)	Reaction Time (ms)				Errors (%)			
					CO	IN	Total	Simon Effect §	CO	IN	Total	Simon Effect §
Nutritional supplementation	PL	Block 1	1370.7 (50.9)	197.9 (17.5)	336.0 (8.7)	365.5 (9.7)	350.7 (6.8)	29.4 (5.7)	4.7 (0.8)	9.8 (1.2)	7.2 (0.8)	5.1 (1.2)
		Block 2	1313.3 (56.8)	201.4 (24.0)	334.3 (7.3)	359.8 (9.0)	347.1 (6.0)	25.5 (5.1)	4.3 (0.9)	8.9 (1.3)	6.6 (0.9)	4.6 (1.3)
		Block 3	1312.7 (58.6)	185.6 (15.9)	323.9 (7.7)	357.6 (7.9)	340.8 (6.0)	33.7 (3.7)	4.6 (0.6)	8.7 (1.2)	6.6 (0.7)	4.2 (1.5)
		Total	1332.2 (31.8)	195.0 (11.1)	331.4 (4.6) ●	361.1 (5.1) ●	346.2 (3.6)	29.5 (2.8) ●	4.5 (0.4)	9.1 (0.7)	6.8 (0.5)	4.6 (0.8)
	CHO	Block 1	1348.9 (44.2)	186.8 (14.5)	334.7 (8.1)	362.2 (8.0)	348.4 (6)	27.5 (6.3)	7.0 (1.5)	10.4 (1.7)	8.7 (1.2)	3.4 (2.6)
		Block 2	1259.2 (41.0)	171.6 14.6)	334.4 (8.4)	361.8 (8.5)	348.1 (6.1)	27.5 (5.5)	3.3 (0.8)	9.5 (0.9)	6.4 (0.8)	6.3 (1.0)
		Block 3	1249.6 (39.4)	161.5 (11.8)	324.2 (8.0)	356.5 (8.1)	354.6 (6.1)	32.3 (5.5)	4.4 (0.9)	9.8 (1.1)	7.1 (0.8)	5.3 (1.2)
		Total	1285.9 (24.3) ◘	173.3 (7.9) ◘ ▲	331.1 (4.7) ●	360.2 (4.7)	345.6 (3.5)	29.1 (3.3) ●	4.9 (0.7)	9.9 (0.7)	7.4 (0.5)	5.0 (1.0)
	CAF	Block 1	1292.6 (24.5)	187.0 (11.8)	338.0 (8.5)	364.4 (8.9)	351.2 (6.3)	26.4 (5.12)	5.1 (0.9)	10.3 (1.3)	7.7 (0.9)	5.2 (1.6)
		Block 2	1255.9 (39.1)	187.3 (14.3)	336.8 (8.0)	360.7 (6.7)	348.8 (5.5)	23.9 (4.6)	3.9 (0.9)	10.5 (1.4)	7.2 (0.9)	6.6 (1.6)
		Block 3	1249.0 (31.5)	167.7 (11.5)	328.4 (7.4)	352.4 (7.4)	340.4 (5.5)	24 (4.7)	4.6 (0.8)	8.5 (1.4)	6.5 (0.9)	3.9 (1.7)
		Total	1265.8 (18.5) ◘	180.7 (7.3) ◘	334.4 (4.6)	359.1 (4.4)	346.8 (3.3)	24.8 (2.8)	4.5 (0.5)	9.8 (0.8)	7.1 (0.5)	5.3 (0.9)
	GUA	Block 1	1311.2 (35.4)	193.7 (15.8)	338.7 (7.9)	370.4 (8.7)	354.6 (6.3)	31.7 (6.4)	5.8 (1.1)	10.5 (1.5)	8.2 (1.0)	4.6 (1.8)
		Block 2	1249.9 (40.4)	176.5 (13.1)	336.8 (7)	365.8 (7.9)	351.3 (5.7)	29 (5.6)	3.8 (0.9)	13.3 (2.3)	8.6 (1.4)	9.5 (2.6)
		Block 3	1281.1 (40.2)	170.5 (13.2)	326.9 (7.9)	360.1 (7.6)	343.5 (6.0)	33.2 (5.4)	3.0 (0.7)	12.0 (1.6)	7.5 (1.1)	9.0 (2.8)
		Total	1280.7 (22.2) ◘	180.2 (8.1) ◘	334.1 (4.4) ■	365.4 (4.6) ●	349.8 (3.4)	30.0 (3.3) ●	4.2 (0.6)	11.9 (1.1)	8.1 (0.7)	7.7 (1.2)
Exercise		Block 1	1331.0 (20.0) $	191.3 (7.4) $	336.9 (4.1)	365.5 (4.4)	351.2 (3.2) $	28.4 (2.9)	5.7 (0.6)	10.2 (0.7)	8.0 (0.5)	8.0 (0.5)
		Block 2	1269.8 (22.3) *	184.3 (8.5) $	335.6 (3.8)	362.0 (4.0)	348.8 (2.9) $	26.2 (2.6)	3.8 (0.4)	10.5 (0.8)	7.1 (0.5)	7.1 (0.5)
		Block 3	1273.0 (21.7) *	171.3 (6.6) *	325.9 (3.8)	356.6 (3.8)	340.9 (2.9)	30.5 (2.4)	4.1 (0.4)	9.7 (0.7)	6.8 (0.4) ~	6.8 (0.4)
		Total	1292.2 (12.4)	182.9 (4.4)	332.9 (2.4)	361.4 (2.3)	347.2 (2.0)	29.95 (1.8)	4.5 (0.3)	10.2 (0.4)	7.4 (0.3)	5.6 (0.5)

§Incongruent (IN) minus congruent (CO) trials. General Linear Models (GLM): * a significant difference was found with block 1; $ a significant difference was found with block 3; ~ a trend effect was found with block 1 ($p < 0.05$). Magnitude based inference: ◘ a difference was found with placebo mouth rinsing, PL MR; ▲ a difference was found with guarana mouth rinsing, GUA MR; • a difference was found with caffeine mouth rinsing, CAF MR; ■ a difference was found with carbohydrate mouth rinsing, CHO MR (75–95% likely different).

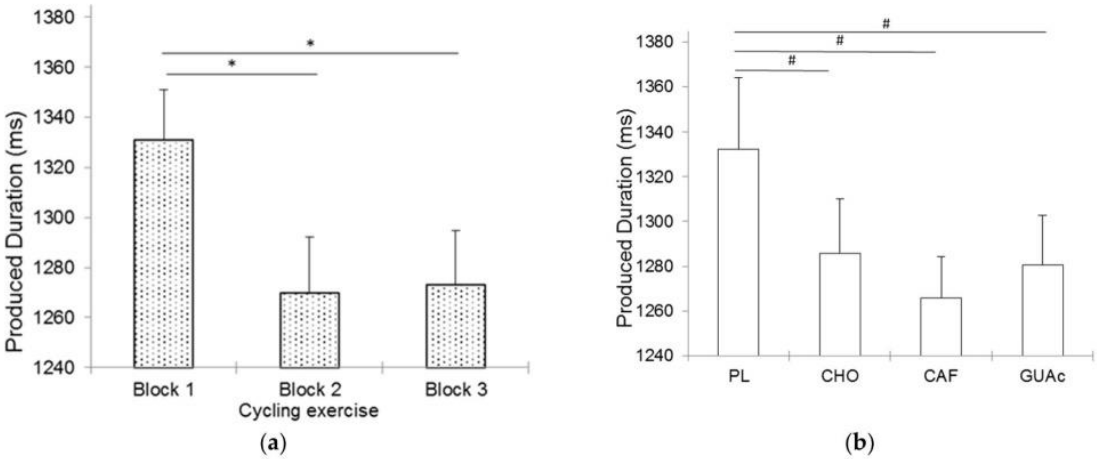

Figure 2. Mean produced durations as a function of exercise (**a**) and supplementation (**b**) Errors bars represent standard errors of the mean produced duration. * $p < 0.05$; # 75–95% likely different.

Variance in Temporal Production

A significant effect of block was observed on the variability ($F(2, 44) = 4.68$, p = 0.01, $\eta_p^2 = 0.18$). The participants were significantly less variable in block 3 in comparison to blocks 1 and 2 (respectively $p = 0.01$ and $p = 0.05$).

Magnitude based inferences showed that CHO, CAF and GUAc MR compared to PL, lead to a likely decrease of variability (respectively 93%, 89% and 92%). Participants were less variable in their temporal production after nutritional supplementation. Furthermore, they were even less variable with CHO when compared to GUAc (likely effect).

3.1.2. Simon Task

The mean RT and the error rate were submitted to separate GLM block (block 1, block 2 and block 3) and congruency (CO and IN) as within-subject factors. Nutritional effect was evaluated with magnitude-based inferences.

Mean RT

Analyses showed a significant effect of exercise on mean RT ($F(2, 44) = 10.1$, $p = 0.0003$, $\eta_p^2 = 0.31$). RTs in Block 3 are significantly faster than RTs in blocks 1 and 2 respectively ($p = 0.001$ and $p = 0.002$). The classic effect of congruency was found on mean RTs ($F(1, 22) = 78.3$, $p = 0.00$, $\eta_p^2 = 0.78$) with slower RT in IN trials compared to RT in CO trials.

For CO trials, magnitude based inference showed that CAF leads to a likely increase of mean RT compared with PL (80%) and CHO (82%), and that CHO leads to a likely decrease of RT compared with GUAc (89%). On IN trials, CAF leads to a likely decrease of mean RT compared to PL (90%) and GUAc (94%) (Figure 3). More interestingly, magnitude based inference on the Simon effect (i.e., difference between mean IN RT and mean CO RT), which is a direct measure of cognitive control, showed a likely decrease with CAF MR (24 ms) when compared with PL (30 ms, 93%), CHO (29 ms, 85%) and GUAc (79%) (Figure 4).

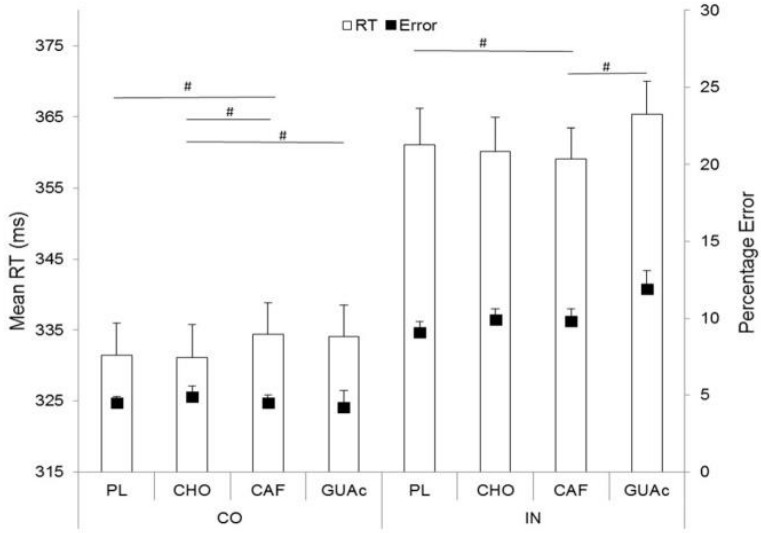

Figure 3. Mean reaction time (RT) and errors as a function of supplementation and congruency. Errors bars represent standard errors of mean RT. # 75–95% likely different.

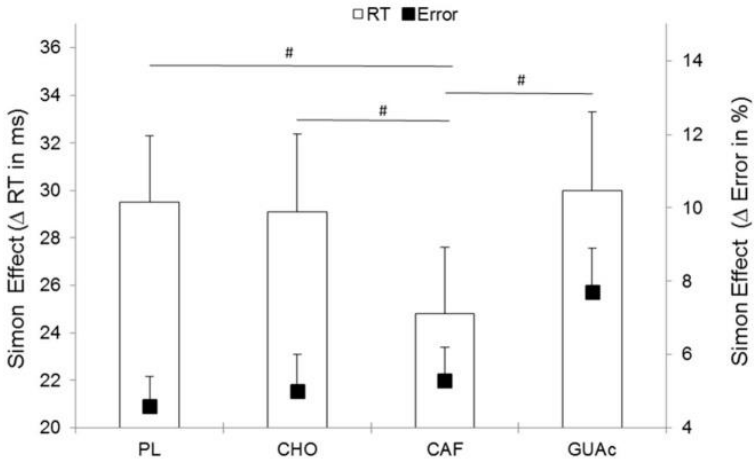

Figure 4. Simon Effect for reaction time (RT) and error as a function of supplementation. Errors bars represent standard errors of the mean Δ. # 75–95% likely different.

Error Rate

Analyses showed a significant effect of congruency ($F(1, 22) = 33.44$ $p = 0.00$, $\eta_p^2 = 0.60$), illustrating the prevalence of more errors in IN trials than in CO trials. The effect of block tended to be significant ($F(2, 44) = 3.8$, $p = 0.07$, $\eta_p^2 = 0.11$). Errors in block 3 tended to be significantly lower than in block 1 ($p = 0.06$). No significant difference between block 2 and respectively blocks 1 ($p = 0.11$) and 3 ($p = 0.47$) was found.

Magnitude based inference did not show any effect of nutritional supplementations on error rate.

3.2. RPE

Magnitude based inferences showed that CHO MR lead to a likely decrease in RPE (11.6 ± 0.7) cm when compared to PL ((12.2 ± 0.8) cm; 87%), GUAc ((12.5 ± 0.8) cm; 91%) and CAF ((12.3 ± 0.7) cm; 91%).

4. Discussion

The aim of this study was to investigate the influence of serial CHO, GUAc and CAF MR both on cognitive performance during a 40-min cycling exercise at a submaximal intensity and on RPE at

the end of the exercise. Specific cognitive processes, such as cognitive control and time perception, considered as being of great importance in goal-oriented behavior, have been investigated through a Simon task and a duration-production task. Several major findings have emerged from this study: 1/CHO, CAF and GUAc MR likely lead participants to produce shorter durations and to reduce temporal variability, 2/CAF MR likely improved cognitive control and CHO MR led to a likely decrease in RPE after exercise. Moreover, performing 40-min of submaximal exercise enhanced information processing in terms of both speed and accuracy, decreased the variance in temporal production, led participants to produce shorter durations and did not alter cognitive control.

4.1. Effect of Physical Exercise on Cognitive Performance

Although the effects of exercise on cognition were not the main purpose, innovative results emerged from this study. It therefore seemed interesting to discuss it in more detail in the first part of the discussion. It is now classically reported that exercise has a positive effect on cognitive tasks, however, cognitive performance has typically been assessed during short duration exercise (about 20 min) or immediately after exercise while limited research has investigated cognition during longer exercises [47]. In the present study, we observed performance improvement in cognitive tasks throughout the exercise. In the duration-production task, participants produced shorter durations after 14 min, and they were less variable after 27 min of cycling exercise when compared to the beginning of the exercise. Most of the models that have been proposed to explain performance in temporal tasks are based on scalar timing theory [48,49]. According to this theory, people are supposed to estimate time intervals using an internal clock functioning as a stopwatch, with a clock stage composed of a pacemaker-counter device. An interval is specified by the accumulation of pulses emitted at a regular rate from the pacemaker. The more pulses that are accumulated, the longer the subjective estimation of duration. Within this framework, one hypothesis to explain shorter produced durations (called underproductions) is an acceleration of the pacemaker rate [39,50,51]. When pacemaker rate increases, pulses are emitted and accumulated faster. The number of pulses corresponding to the standard duration they have learned during the training session, would then be accumulated in a shorter time interval, leading to the production of shorter durations. The present data thus suggest that submaximal exercise leads to an acceleration of the pacemaker rate. In literature investigating the psychology of time, several studies show that the acceleration of the pacemaker rate is related to an increase in cortical arousal [39,50]. Moreover, we have observed a decrease in temporal variability, which is also classically explained by an increase in alertness level [52]. This increase in cortical arousal could be induced by an enhancement of the noradrenergic and dopaminergic systems during exercise [53,54]. During exercise the sympathetic nervous system is rapidly stimulated, leading to large increases in the secretion of adrenaline and noradrenaline from the adrenal medulla and noradrenaline from sympathetic nerves. Even if catecholamines do not cross the blood brain barrier [55], evidence has shown that a peripheral circulating catecholamines increase during exercise is related, by several mechanisms, to an increase in concentrations of brain catecholamines, which activate the prefrontal cortex and other associated areas [56,57].

After 23 min of cycling, a positive effect of exercise was also observed in the Simon task in which we observed faster RTs without an increase of error rate (trend to lower error rates from the 13th min of exercise is even observed). Several meta-analyses and integrative reviews report that cognitive performance can be improved during acute exercise depending on factors like physical exercise intensity and duration, physical fitness of participants and the nature of the cognitive tasks [47,58,59]. This benefit can be explained by an enhancement of sensory sensibility [60], a better efficiency of peripheral motor processes [61,62] and/or a reduction in intracortical inhibition accompanied by an increase in corticospinal excitability [53]. The results of the present study are in line with these findings. Indeed, both the improvement of the information processing and the temporal variability and the underproduction of durations, suggest a possible increase in the brain activation level, which would result from an activation of the reticular-activating system [54].

However, cognitive processes seem to be differentially sensitive to the effect of exercise. To date, the accumulated evidence is equivocal and provides an unclear picture of the relationship between

exercise intensity and cognitive control. Despite some evidence that suggests an impairment of cognitive control (using a Simon task or a similar conflict task) during exercise [63,64], others [65,66] fail to observe any deteriorations of selective response inhibition or rather report an improvement despite very high physiological stress [67]. In this study, the lack of exercise effect on the interference effect (as shown by the absence of significant block x congruency interaction) suggested that the ability to inhibit prepotent responses remains fully efficient during exercise.

4.2. Mouth Rinse Effect on Cognitive Performance

Concerning the MR effects on cognitive performance, magnitude based inferences showed that CHO, CAF and GUAc MR likely lead to shorter produced durations and a decrease in temporal production variability. As previously noticed, temporal underproductions may be explained by an acceleration of the pacemaker rate due to an increase in arousal level [39,50]. This increase of cortical arousal is also consistent with an acceleration in RTs. RTs were likely shorter in the IN trials (with no variation in the error rate) after CAF MR compared to PL and GUAc MR. This improvement resulted in a decrease in the Simon effect (or interference effect), which is a direct measure of cognitive control and highlighted an improvement in cognitive performance.

The ergogenic effect of CAF on physical and cognitive performance has already been reported after ingestion [3,68]. It has been proposed that it could be at least partially related to competitive inhibition of adenosine receptors [69]. The effects of CHO ingestion on cognitive performance have not been thoroughly investigated but some studies report a positive effect on cognition. For example, a positive effect of CHO ingestion has been observed on RT after exercise [70,71]. Moreover, Lieberman and colleagues [72] found an improvement in vigilance and mood during sustained physical activity with CHO ingestion. The hypothesis is that CHO intake may affect cognition by modulating the synthesis of certain neurotransmitters. The most cited are acetylcholine, which is dependent upon glucose for its synthesis, and brain serotonin, a neurotransmitter associated with sleepiness (for review, see Reference [69]).

The effect of nutritional MR without ingestion was more specifically investigated in the present study. Several studies highlighted that CHO and CAF MR could have a positive effect on physical [12,17,18,25,73,74] and on cognitive performance [13,15,21]. The present results showed that both CHO and CAF MR lead to underproduced durations and a reduction of temporal variability both considered to be due to an increase in cortical activation level in the field of the psychology of time [39,50]. This is consistent with data from electroencephalographic activity (EEG) reported by de Pauw and collaborators [21]. Measures of cortical brain activity were regarded as an index of cortical arousal and served as a sensitive indication of the stimulating effects of CAF on brain functioning. Results report that CAF MR exert a likely beneficial effect on RT in IN trials only in a Stroop Task which is entirely consistent with our results showing that CAF MR only lead to shorter RT with no errors shift in IN trials. The authors proposed that the observed effect was due to the subsequent activation of both orbitofrontal and dorsolateral prefrontal cortices. They also observed that CHO MR induced a higher brain activity within the orbitofrontal cortex but had no effect on RT.

Concerning GUAc MR, we found some effects in the temporal task. Participants underproduced durations after GUAc MR compared with PL MR, which suggests that GUAc MR increased brain activation level as did CHO and CAF MR. To our knowledge, this is the first time that the effect of GUA MR was observed on cognitive performance. The duration-production task is known to be highly sensitive to arousal manipulation, which could explain why data exhibited no effect in the Simon task.

Finally, magnitude based inferences have also revealed that CHO MR leads to a likely decrease in RPE for the same power output compared to PL. This result is very interesting since results are mixed and most studies have failed to observe benefits from CHO MR [9,44,75–77] and CAF MR [18,78] on perception of effort. Only a few studies have reported that CAF and CHO MR could lead to a decrease in RPE [25–27] suggesting that CHO and CAF MR induce a decrease in subjective perception of effort, allowing participants to produce more power with the same degree of discomfort. This finding may be explained by the activation of reward areas reported by Silva et al.

[17] via stimulation of CHO receptors in the mouth. Indeed, the activation of the insula/frontal operculum, orbitofrontal cortex and striatum, could result in a lowering perceived exertion during exercise. Chambers (2009) [13] suggested that the activation of these brain areas could modify fatigue signals sent from the muscles and result in lower subjective perception of effort for the same power output. Concerning GUAc, our results failed to highlight a positive effect on RPE as observed in a recent study using GUAc ingestion [34]. The authors observed a small but significant reduction in RPE during a 30-min treadmill running exercise after ingestion of multivitamin and mineral complex with guarana. The difference of results could be due, first, to the lower amount of GUAc used in our study compared to Veasey and colleagues' study [34] and, second, to the different administration modes (ingestion versus MR). We can hypothesize that with MR, a larger amount of GUA would be required to impact the RPE.

One limitation of the present study is the use of a multivitamin and mineral complex with guarana instead of GUA solely, which did not allow isolate the pure effect of GUA MR on performance. At present, mechanisms accountable of ergogenic effects of GUA ingestion on cognitive performance need to be further investigated. We should also note that some studies suggest that oral contraceptive steroids and estrogen have a significant impact on caffeine metabolism [79] and that RT lengthens in the high-progesterone, luteal phase of the menstrual cycle [80]. The fact that the influence of different phases of menstrual cycle of the female participants has not been controlled in the present study, due to methodological difficulties, is also a limitation. Further controlled studies will be necessary to examine potential interactions with mouth rinsing.

Magnitude based inferences showed that CHO, CAF and GUAc MR enhance performance. It is still important to note that nutritional supplements benefited only half of the participants. However, when a beneficial effect of MR was observed it was up to two to three times greater than the deterioration (or lack of effect) observed on the other half of the subjects. These findings suggest that, as for ingestion of nutritional supplementations, the effects of MR on performance are highly variable between individuals. Before using nutritional strategies with athletes during sporting events, it seems essential to determine beforehand whether the athlete is a good or bad responder.

5. Conclusions

The present study was the first to investigate the effects of different nutritional supplements MR on cognitive performance during exercise. Our data have suggested that the serial administration of CHO, CAF and GUAc MR improves cognitive performance and decreases subjective perception of effort. Moreover, they confirm that submaximal exercise increased arousal levels leading to an improvement in cognitive performance [53,54]. The present study provided important new insights regarding the specific changes in cognitive processes induced by nutritional supplements and opened up new perspectives regarding the use of MR to optimize cognitive performance during exercise. Obviously, some further studies are needed to confirm these results and to more investigate specific cognitive processes in more depth. Moreover, while the present study involved a 40-min cycling exercise at a submaximal intensity, which is longer than, most of the previous studies, future studies involving more exhausting exercises, in terms of duration and/or intensity, are needed to further elucidate the relationships between nutrition supplements and fatigue and to uncover whether interactions between these two factors could emerge.

Supplementary Materials: The following are available online at www.mdpi.com/2072-6643/9/6/589/s1.

Acknowledgments: We thank all the participants for participating to this study, the CREPS PACA and Squash French Federation for financial support. Thanks also to Jennifer Joyce for her proofreading of the final version of the manuscript.

Author Contributions: J.B., K.D., L.C. and L.P. conceived and designed the experiments; L.P. performed the experiments; J.B., K.D., L.C. and L.P. analyzed the data; A.H contributed reagents/materials/analysis tools; J.B., K.D., L.C. and L.P. wrote the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Close, G.L.; Hamilton, D.L.; Philp, A.; Burke, L.M.; Morton, J.P. New strategies in sport nutrition to increase exercise performance. *Free Radic. Biol. Med.* **2016**, *98*, 144–158, doi:10.1016/j.freeradbiomed.2016.01.016.
2. Vandenbogaerde, T.J.; Hopkins, W.G. Effects of Acute Carbohydrate Supplementation on Endurance Performance. *Sports Med.* **2011**, *41*, 773–792, doi:10.2165/11590520-000000000-00000.
3. Glade, M.J. Caffeine-Not just a stimulant. *Nutrition* **2010**, *26*, 932–938, doi:10.1016/j.nut.2010.08.004.
4. Glaister, M.; Howatson, G.; Abraham, C.S.; Lockey, R.A.; Goodwin, J.E.; Foley, P.; McInnes, G. Caffeine supplementation and multiple sprint running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 1835–1840, doi:10.1249/MSS.0b013e31817a8ad2.
5. Hogervorst, E.; Bandelow, S.; Schmitt, J.; Jentjens, R.; Oliveira, M.; Allgrove, J.; Carter, T.; Gleeson, M. Caffeine improves physical and cognitive performance during exhaustive exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 1841–1851, doi:10.1249/MSS.0b013e31817bb8b7.
6. McNaughton, L.R.; Lovell, R.J.; Siegler, J.; Midgley, A.W.; Moore, L.; Bentley, D.J. The effects of caffeine ingestion on time trial cycling performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2008**, *3*, 157–163.
7. Graham, T.E. Caffeine and exercise: Metabolism, endurance and performance. *Sports Med.* **2001**, *31*, 785–807.
8. Cermak, N.M.; van Loon, L.J.C. The Use of Carbohydrates during Exercise as an Ergogenic Aid. *Sports Med.* **2013**, *43*, 1139–1155, doi:10.1007/s40279-013-0079-0.
9. Carter, J.M.; Jeukendrup, A.E.; Jones, D.A. The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2004**, *36*, 2107–2111, doi:10.1249/01.MSS.0000147585.65709.6F.
10. Jeukendrup, A.E.; Brouns, F.; Wagenmakers, A.J.M.; Saris, W.H.M. Carbohydrate-Electrolyte Feedings Improve 1 h Time Trial Cycling Performance. *Int. J. Sports Med.* **1997**, *18*, 125–129, doi:10.1055/s-2007-972607.
11. Jeukendrup, A.E. Oral Carbohydrate rinse: Placebo or beneficial? *Curr. Sports Med. Rep.* **2013**, *12*, 222–227, doi:10.1249/JSR.0b013e31829a6caa.
12. Beaven, C.M.; Maulder, P.; Pooley, A.; Kilduff, L.; Cook, C. Effects of caffeine and carbohydrate mouth rinses on repeated sprint performance. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2013**, *38*, 633–637, doi:10.1139/apnm-2012-0333.
13. Chambers, E.S.; Bridge, M.W.; Jones, D.A. Carbohydrate sensing in the human mouth: Effects on exercise performance and brain activity. *J. Physiol.* **2009**, *587*, 1779–1794, doi:10.1113/jphysiol.2008.164285.
14. James, R.M.; Ritchie, S.; Rollo, I.; James, L.J. No Dose Response Effect of Carbohydrate Mouth Rinse on Cycling Time Trial Performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2016**, *27*, 1–21.
15. Philips, S.M.; Findlay, S.; Kavaliauskas, M.; Grant, M.C. The Influence of Serial Carbohydrate Mouth Rinsing on Power Output during a Cycle Sprint. *J. Sports Sci. Med.* **2014**, *13*, 252–258.
16. Pottier, A.; Bouckaert, J.; Gilis, W.; Roels, T.; Derave, W. Mouth rinse but not ingestion of a carbohydrate solution improves 1-h cycle time trial performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2010**, *20*, 105–111, doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00868.x.
17. E Silva, T.A.; Di Cavalcani Aves de Souza, M.E.; de Amorin, J.F.; Stathis, C.G.; Leandro, C.G.; Lima-Silva, A.E. Can Carbohydrate Mouth Rinse Improve Performance during Exercise? A systematic Review. *Nutrients* **2014**, *6*, 1–10, doi:10.3390/nu6010001.
18. Doering, T.M.; Fell, J.W.; Leveritt, M.D.; Desbrow, B.; Shing, C.M. The effect of a caffeinated mouth-rinse on endurance cycling time-trial performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2014**, *24*, 90–97, doi:10.1123/ijsnem.2013-0103.
19. Turner, C.E.; Byblow, W.D.; Stinear, C.M.; Gant, N. Carbohydrate in the mouth enhances activation of brain circuitry involved in motorperformance and sensory perception. *Appetite* **2014**, *80*, 212–219, doi:10.1016/j.appet.2014.05.020.
20. Gam, S.; Guelfi, K.J.; Fournier, P.A. New Insights into enhancing maximal exercise performance through the use of bitter tastant. *Sports Med.* **2016**, *46*, 1385–1390, doi:10.1007/s40279-016-0522-0.
21. De Pauw, K.; Roelands, B.; Knaepen, K.; Polfiet, M.; Stiens, J.; Meeusen, R. Effects of caffeine and maltodextrin mouth rinsing on P300, brain imaging and cognitive performance. *J. Appl. Physiol.* **2015**, *118*, 776–782, doi:10.1152/japplphysiol.01050.2014.
22. Kaminori, G.H.; Karyekar, C.S.; Otterstetter, R.; Cox, D.S.; Balkin, T.J.; Belenky, G.L.; Eddington, N.D. The rate of absorption and relative bioavailability of caffeine administered in chewing gum versus capsules to normal healthy volunteers. *Int. J. Pharm.* **2002**, *234*, 159–167.

23. De Pauw, K.; Roelands, B.; van Cutsem, J.; Marusic, U.; Torbeyns, T.; Meeusen, R. Electro-physiological changes in the brain induced by caffeine or glucose nasal spray. *Psychopharmacology* **2016**, doi:10.1007/s00213-016-4435-2.
24. Pageaux, B. Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. *Eur. J. Sport Sci.* **2016**, *16*, 885–894, doi:10.1080/17461391.2016.1188992.
25. Bastos-Silva, V.J.; Melo, A.A.; Lima-Silva, A.E.; Moura, F.A.; Bertuzzi, R.; de Araujo, G.G. Carbohydrate Mouth Rinse Maintains Muscle Electromyographic Activity and Increases Time to Exhaustion during Moderate but not High-Intensity Cycling Exercise. *Nutrients* **2016**, *8*, 49, doi:10.3390/nu8030049.
26. Fares, E.J.M.; Kayser, B. Carbohydrate mouth rinse effects on exercise capacity in pre-post prandial states. *J. Nutr. Metab.* **2011**, doi:10.1155/2011/385962.
27. Sinclair, J.; Bottoms, L.; Flynn, C.; Bradley, E.; Alexander, G.; McCullagh, S.; Finn, T.; Hurst, H.T. The effect of different durations of carbohydrate mouth rinse on cycling performance. *Eur. J. Sport Sci.* **2014**, *14*, 259–264, doi:10.1080/17461391.2013.785599.
28. Schimpl, F.; Silva, J.; Goncalves, J.; Mazzafera, P. Guarana: Revisiting a highly caffeinated plant from the Amazon. *J. Ethnopharmacol.* **2013**, *150*, 14–31.
29. Scholey, A.; Haskell, C. Neurocognitive effects of guaraná plant extract. *Drugs Futur.* **2008**, *33*, 869–874, doi:10.1358/dof.2008.33.10.1250977. 12.
30. Espinola, E.B.; Dias, R.F.; Mattei, R.; Carlini, E.A. Pharmacological activity of Guarana (*Paullinia cupana* Mart.) in laboratory animals. *J. Ethnopharmacol.* **1997**, *55*, 223–229.
31. Mattei, R.; Dias, R.F.; Espínola, E.B.; Carlini, E.A.; Barros, S.B. Guarana (*Paullinia cupana*): Toxic behavioral effects in laboratory animals and antioxidants activity in vitro. *J. Ethnopharmacol.* **1998**, *60*, 111–116.
32. Pomportes, L.; Davranche, K.; Brisswalter, I.; Hays, A.; Brisswalter, J. Heart Rate Variability and Cognitive Function Following a multi-vitamin and Mineral Supplementation with added Guarana (*Paullinia cupana*). *Nutrients* **2014**, *7*, 196–208, doi:10.3390/nu7010196.
33. Kennedy, D.O.; Haskell, C.F.; Wesnes, K.A.; Scholey, A.B. Improved cognitive performance in human volunteers following administration of guarana (*Paullinia cupana*) extract: Comparison and interaction with Panax ginseng. *Pharmacol. Biochem. Behav.* **2004**, *79*, 401–411, doi:10.1016/j.pbb.2004.07.014.
34. Veasey, R.C.; Haskell-Ramsay, C.F.; Kennedy, D.O.; Wishart, K.; Maggini, S.; Fuchs, C.J.; Stevenson, E.J. The Effects of Supplementation with a Vitamin and Mineral Complex with Guaraná Prior to Fasted Exercise on Affect, Exertion, Cognitive Performance, and Substrate Metabolism: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **2015**, *7*, 6109–6127, doi:10.3390/nu7085272.
35. Kennedy, D.O.; Haskell, C.F.; Robertson, B.; Reay, J.; Brewster-Maund, C.; Luedemann, J.; Maggini, S.; Ruf, M.; Zangara, A.; Scholey, A.B. Improved cognitive performance and mental fatigue following a multi-vitamin and mineral supplement with added guaraná (*Paullinia cupana*). *Appetite* **2008**, *50*, 506–513.
36. Soares, S.; Kohl, S.; Thalmann, S.; Mateus, N.; Meyerhof, W.; de Freitas, V. Different phenolic compounds activate distinct human bitter taste receptors. *J. Agric. Food Chem.* **2013**, *61*, 1525–1533.
37. Millet, G.Y.; Lepers, R. Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med.* **2004**, *34*, 105–116.
38. Simon, J.R.; Rudell, A.P. Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *J. Appl. Psychol.* **1967**, *51*, 300–304.
39. Burle, B.; Casini, L. Dissociation between Activation and Attention Effects in Time Estimation: Implications for Internal Clock Models. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **2001**, *27*, 195–205, doi:10.1037//0096-1523.27.1.195.
40. McGowan, C.J.; Pyne, D.B.; Thompson, K.G.; Rattray, B. Warm-Up Strategies for Sport and Exercise: Mechanisms and Applications. *Sports Med.* **2015**, *45*, 1523–1546.
41. Casini, L.; Ramdani-Beauvir, C.; Burle, B.; Vidal, F. How does one night of sleep deprivation affect the internal clock? *Neuropsychologia* **2013**, *51*, 275–283.
42. Ueda, T.; Nabetani, T.; Teramoto, K. Differential perceived exertion measured using a new visual analogue scale during pedaling and running. *J. Physiol. Anthropol.* **2006**, *25*, 171–177.
43. Hopkins, W.G.; Marshall, S.W.; Batterham, A.M.; Hanin, J. Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *41*, 3–12, doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278.
44. Luden, N.D.; Saunders, M.J.; D'Lugos, A.C.; Pataky, M.W.; Baur, D.A.; Vining, C.B.; Schroer, A.B. Carbohydrate Mouth Rinsing Enhances High Intensity Time Trial Performance Following Prolonged Cycling. *Nutrients* **2016**, *8*, 576, doi:10.3390/nu8090576.

45. Pataky, M.W.; Womack, C.J.; Saunders, M.J.; Goffe, J.L.; D'Lugos, A.C.; El-Sohemy, A.; Luden, N.D. Caffeine and 3-km cycling performance: Effects of mouth rinsing, genotype, and time of the day. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2016**, *26*, 613–619, doi:10.1111/sms.12501.
46. Le Meur, Y.; Pichon, A.; Schaal, K.; Schmidtt, L.; Louis, J.; Gueneron, J.; Vidal, P.P.; Hausswirth, C. Evidence of Parasympathetic Hyperactivity in Functionally Overreached Athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2013**, doi:10.1249/MSS.0b013e3182980125.
47. Lambourne, K.; Tomporowski, P. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A meta-regression analysis. *Brain Res.* **2010**, *1341*, 12–24, doi:10.1016/j.brainres.2010.03.091.
48. Gibbon, J. Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychol. Rev.* **1977**, *84*, 279–325.
49. Gibbon, J.; Church, R.M.; Meck, W.H. Scalar Timing in Memory. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1984**, *423*, 52–77, doi:10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x.
50. Penton-Voak, I.S.; Edwards, H.; Percival, A.; Wearden, J.H. Speeding up an internal clock in humans? Effects of click trains on subjective duration. *J. Exp. Psychol. Anim. Behav. Process.* **1996**, *22*, 307–320.
51. Wearden, J.H.; Edwards, H.; Fakhri, M.; Percival, A. Slowing down an internal clock: Implications for accounts of performance on four timing tasks. *Q. J. Exp. Psychol.* **2008**, *51*, 97–120.
52. Droit-Volet, S. Alerting attention and time perception in children. *J. Exp. Child Psychol.* **2003**, *85*, 372–394.
53. Davranche, K.; Temesi, J.; Verges, S.; Hasbroucq, T. Transcranial magnetic stimulation probes the excitability of the primary motor cortex: A framework to account for the facilitating effects of acute whole-body exercise on motor processes. *J. Sport Health Sci.* **2015**, *4*, 24–29.
54. Dietrich, A.; Audiffren, M. The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **2011**, *35*, 1305–1325, doi:10.1016/j.neubiorev.2011.02.001.
55. Kostrzewa, R.M. The blood-brain barrier for catecholamines—Revisited. *Neurotox. Res.* **2007**, *11*, 261–271.
56. McMorris, T.; Hale, B.J.; Corbett, J.; Robertson, K.; Hodgson, C.I. Does acute exercise affect the performance of whole-body, psychomotor skills in an inverted-U fashion? A meta-analytic investigation. *Physiol. Behav.* **2015**, *141*, 180–189.
57. Tank, A.W.; Lee, W.D. Peripheral and central effects of circulating catecholamines. *Compr. Physiol.* **2015**, *5*, 1–15.
58. Brisswalter, J.; Collardeau, M.; Arcelin, R. Effects of acute physical exercise on cognitive performance. *Sports Med.* **2002**, *32*, 555–566, doi:10.2165/00007256-200232090-00002.
59. Tomporowski, P.D. Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychol.* **2003**, *112*, 297–324.
60. Davranche, K.; Pichon, A. Critical flicker frequency thresholds increment after exhanding exercise. *J. Sport Exerc. Psychol.* **2005**, *27*, 515–520, doi:10.1123/jsep.27.4.515.
61. Davranche, K.; Burle, B.; Audiffren, M.; Hasbroucq, T. Information processing during physical exercise: A chronometric and electromyographic study. *Exp. Brain Res.* **2005**, *165*, 532–540, doi:10.1007/s00221-005-2331-9.
62. Davranche, K.; Burle, B.; Audiffren, M.; Hasbroucq, T. Physical exercise facilitates motor processes in simple reaction time performance: An electromyographic analysis. *Neurosci. Lett.* **2006**, *396*, 54–56, doi:10.1016/j.neulet.2005.11.008.
63. Davranche, K.; Paleresompoulle, D.; Pernaud, R.; Labarelle, J.; Hasbroucq, T. Decision making in elite white-water athletes paddling on a kayak ergometer. *J. Sport Exerc. Psychol.* **2009**, *31*, 554–565, doi:10.1123/jsep.31.4.554.
64. McMorris, T.; Davranche, K.; Jones, G.; Hall, B.; Corbett, J.; Minter, C. Acute incremental exercise, performance of a central executive task, and sympathoadrenal system and hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity. *Int. J. Psychophysiol.* **2009**, *73*, 334–340, doi:10.1016/j.ijpsycho.2009.05.004.
65. Davranche, K.; Brisswalter, J.; Radel, R. Where are the limits of the effects of exercise intensity on cognitive control? *J. Sport Health Sci.* **2015**, *4*, 56–63.
66. Davranche, K.; Hall, B.; McMorris, T. Effect of acute exercise con cognitive control required on during an Eriksen flanker task. *J. Sport Exerc. Psychol.* **2009**, *31*, 628–639.
67. Schmit, C.; Davranche, K.; Easthope, C.S.; Colson, S.S.; Brisswalter, J.; Radel, R. Pushing to the limits: The dynamics of cognitive control during exhausting exercise. *Neuropsychologia* **2015**, *68*, 71–81, doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.01.006
68. Ali, A.; D'Donnelll, J.; Foskett, A.; Rutherfurd-Markwick, K. The influence of caffeine ingestion on strength and power performance in female team-sport players. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2016**, *13*, 46, doi:10.1186/s12970-016-0157-4.

69. Baker, L.B.; Nuccio, R.P.; Jeukendrup, A.E. Acute effects of dietary constituents on motor skill and cognitive performance in athletes. *Nutr. Rev.* **2014**, *72*, 790–802, doi:10.1111/nure.12157.
70. Bottoms, L.M.; Hunter, A.M.; Galloway, S.D.R. Effects of carbohydrate ingestion in skill maintenance in squash players. *Eur. J. Sport Sci.* **2006**, *6*, 187–195, doi:10.1080/17461390600804455.
71. Collardeau, M.; Brisswalter, J.; Vercruyssen, F.; Audiffren, M.; Goubault, C. Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate avaibility. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2001**, *86*, 150–156.
72. Lieberman, H.R.; Falco, C.M.; Slade, S.S. Carbohydrate administration during a day of sustained aerobic activity improves vigilance, as assessed by a novel ambulatory monitoring device, and mood. *Am. J. Clin. Nutr.* **2002**, *76*, 120–127.
73. Chong, E.; Guelfi, K.J.; Fournier, P.A. Effect of carbohydrate mouth rinse on maximal sprint performance in competitive male cyclists. *J. Sci. Med. Sport* **2011**, *14*, 162–167, doi:10.1016/j.jsams.2010.08.003.
74. Jeukendrup, A.E.; Rollo, I.; Carter, J.M. Carbohydrate mouth rinse: Performance effects and mechanisms. *Sport Sci. Exch.* **2013**, *26*, 1–8.
75. Beelen, M.; Berghuis, J.; Bonaparte, B.; Ballak, S.B.; Jeukendrup, A.E.; van Loon, L.J.C. Carbohydrate mouth rinsing in the fed state: Lack of enhancement of time-trial performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2009**, *19*, 400–409, doi:10.1123/ijsnem.19.4.400.
76. Devenney, S.; Collins, K.; Shortall, M. Effects of various concentrations of carbohydrate mouth rise on cycling performance in a fed state. *Eur. J. Sport. Sci.* **2016**, *16*, 1073–1078, doi:10.1080/17461391.2016.1196735.
77. Fraga, C.; Velasques, B.; Koch, A.J.; Machado, M.; Paulucio, D.; Ribeiro, P.; Pompeu, F.A. Carbohydrate mouth rinse enhances time to exhaustion during treadmill exercise. *Clin. Physiol. Funct. Imaging* **2017**, *37*, 17–22, doi:10.1111/cpf.12261.
78. Clarke, N.D.; Kornilios, E.; Richardson, D.L. Carbohydrate and caffeine mouth rinses do not affect maximum strength and muscular endurance performance. *J. Strength Cond. Res.* **2015**, *29*, 2926–2931, doi:10.1519/JSC.0000000000000945.
79. Lane, J.; Steege, J.; Rupp, S.; Kuhn, C. Menstrual cycle effects on caffeine elimination in the human female. *Eur. J. Clin. Pharmacol.* **1992**, *43*, 543–546.
80. Kumar, S.; Mufti, M.; Kisan, R. Variation of reaction time in different phases of menstrual cycle. *J. Clin. Diagn. Res.* **2013**, *7*, 1604–1605.

© 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Etude n°5 : Les suppléments nutritionnels améliorent-ils la performance cognitive des sportifs de haut niveau ?

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet de l'ingestion de différentes stratégies nutritionnelles sur le traitement de l'information et le contrôle de l'interférence après un exercice de course sous-maximal, chez des athlètes de haut niveau en Pentathlon Moderne. Nous avons aussi choisi d'évaluer l'effet de la nutrition sur la performance de tir, car il s'agit d'un élément prépondérant dans la performance de l'épreuve de combinée. Il a été suggéré que la nutrition et notamment la caféine pouvait améliorer la performance de tir lors de fort stress physiologique (Tharion, Shukitt-Hale, et Lieberman 2003). Un objectif annexe de cette étude, qui n'est pas présenté dans le papier soumis, était d'évaluer l'effet de l'ingestion couplée d'hydrates de carbone et de caféine, ou d'hydrates de carbone et de guarana sur le fonctionnement cognitif. En effet, dans la littérature certaines données expérimentales suggèrent que l'ingestion couplée d'hydrates de carbone et de caféine a le potentiel d'augmenter le taux d'oxydation des CHO au cours d'un exercice d'endurance (Van Nieuwenhoven, Brummer et Brouns 2000) et d'améliorer la vitesse de resynthèse du glycogène musculaire, comparé à l'ingestion d'hydrates de carbone seuls (Pedersen et al. 2008). Néanmoins relativement peu d'études en ont investigué l'effet sur la performance cognitive et la perception de l'effort.

Dix jeunes athlètes (4 filles et 6 garçons) du pôle France de Pentathlon Moderne ont participé à 6 sessions expérimentales contrebalancées, séparées *a minima* de 72 heures. En début de session expérimentale, les sujets devaient réaliser l'exercice de tir au pistolet dans des conditions proches de celles retrouvées dans une

épreuve de combinée, suivi de la tâche de Simon (bloc 1, B1) et de l'ingestion de 250 ml de l'une des boissons. Ingérées en simple aveugle, les solutions étaient composées d'hydrates de carbone (CHO) (fructose, maltodextrine, 6%), de caféine (CAF) (200 mg), d'un complexe de guarana multivitaminé (GUAc) (300 mg) ou d'un placebo (Pl). Bien que cela ne soit pas mentionné dans ce papier, deux conditions supplémentaires correspondant à l'ingestion couplée de CHO et de GUAc (condition CHO + GUAc) et de CHO et de CAF (condition CHO + CAF) étaient réalisées. Après 25 minutes de repos, les sujets devaient réitérer l'exercice de tir suivi de la tâche de Simon (bloc 2, B2) et de l'ingestion de 125 ml de la même boisson. Ils commençaient ensuite un exercice de course sous-maximal de 40 minutes réalisé sur tapis. Durant l'exercice, le RPE était mesuré par l'échelle 6-20 de Borg (Borg 1982) à 10, 20, 30 et 40 minutes de course. Cent-vingt-cinq ml de boisson supplémentaire étaient ingérés à la mi-parcours. Enfin dès l'arrêt de l'exercice, les sujets réalisaient l'exercice de tir au pistolet suivie de la tâche de Simon (bloc 3, B3). Des variables de contrôle telle que la fréquence cardiaque et la lactatémie étaient mesurées respectivement au cours de l'exercice et avant/après l'exercice.

Les résultats indiquent que l'exercice améliore le TR de +3,5% (Δ = 12 ms) lors d'une tâche décisionnelle. Par ailleurs, afin de décrire précisément la façon dont l'exercice affecte le TR, nous avons souhaité un outil plus analytique que des simples indices de tendance centrale, les « analyses de distribution ». La technique consiste à classer les données de chaque sujet par ordre croissant, puis à décomposer les distributions de TR en classes de mêmes effectifs appelées « quantiles ». Une distribution vincentisée pour chaque sujet, puis chaque groupe, est réalisée respectivement par calcul du TR moyen de chaque quantile pour un sujet, puis en

moyennant les distributions individuelles quantile par quantile pour tous les sujets. L'ensemble des distributions obtenues est représenté par la « fonction de densité cumulée » représentant la probabilité d'occurrence de la réponse en fonction du TR. Cet outil a deux principaux avantages. Dans un premier temps, les analyses de distribution permettent d'évaluer si les changements observés lors d'une condition expérimentale affectent l'intégralité des TR, qui se manifesterait par un décalage de la courbe de densité de probabilité dans son intégralité, ou si au contraire, ces changements n'affectent que certains types d'essais (modification de la forme de la courbe de densité de probabilité). Elles permettent aussi de limiter les erreurs d'interprétation notamment lorsque les manipulations expérimentales semblent n'avoir aucun effet sur la moyenne. En effet, il est possible d'envisager un décalage de la courbe de densité probabilité associé à une modification de sa forme, et cela en l'absence de modification de sa valeur moyenne. Les analyses de distribution permettent donc de mettre en exergue un effet resté imperceptible avec de simples outils de tendances centrales. L'utilisation des analyses de distribution (données non présentées dans le papier soumis) indiquent que cet effet favorable de l'exercice s'exerce essentiellement sur les TR les plus longs (effet d'interaction exercice × décile : $F(4, 32) = 9.4$, $p < .001$, $np^2 = .54$) (décile_1 vs décile_2, $p = .4$; décile_2 vs décile_3 : $p = .4$; décile_3 vs décile_4, $p = .03$ et décile_4 vs décile_5 : $p = .03$) (Figure 18).

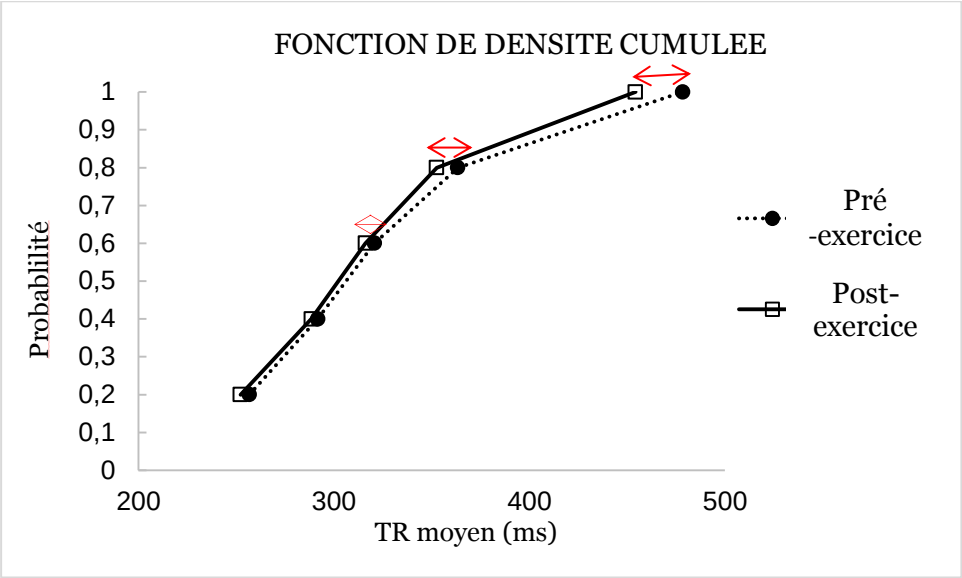

FIGURE 18 – **Distribution des TR pour les conditions pré-exercice (ligne pointillée, point noir plein) et post-exercice (ligne noire pleine et carré vide).** Le décalage de la courbe vers la gauche dans la condition post-exercice à mesure de l'augmentation du TR moyen suggère que l'effet favorable de l'exercice se situe essentiellement sur les TR les plus longs.

Une amélioration du TR est aussi retrouvée avec l'ingestion de CHO, CAF et GUAc après l'exercice, comparée au Pl (CHO = +4%, Δ = 14 ms ; CAF = +4%, Δ = 13 ms ; GUAc = +3%, Δ = 10 ms). En revanche, aucun effet de la nutrition ou de l'exercice n'est observé sur l'effet d'interférence.

Dans l'analyse de l'ingestion couplée de CHO + CAF et de CHO + GUAc, les résultats suggèrent une absence d'effet d'interaction boisson × ingestion (B1 vs B2) et boisson × exercice (B2 vs B3) sur le TR (respectivement $F(4, 32) = 1.2$, $p = .34$, $\eta p^2 = .13$ et $F(4, 28) = 1{,}14$, $p = .35$, $\eta p^2 = .14$). Par ailleurs, aucun effet d'interaction boisson × ingestion × congruence (B1 vs B2) et boisson × exercice × congruence (B2 vs B3), qui refléterait un effet sur le contrôle de l'interférence, n'a été observé (respectivement $F(4, 32) = 0.41$, $p = .80$, $\eta p^2 = .04$ et $F(4, 28) = 0.84$, $p = .51$, $\eta p^2 = .11$) (données non présentées dans le papier soumis). Il semblerait donc que l'ingestion

d'hydrates de carbone couplée à la caféine ou au guarana ne présente aucun avantage sur la performance de tâches décisionnelle et sur le contrôle de l'interférence, comparée à l'ingestion de ces supplémentations de façon isolée.

Par ailleurs, les résultats indiquent que les conditions CAF et GUAc entraînent une élévation moindre du RPE au cours de l'exercice comparées à la condition Pl (respectivement -8% et -12%). Aucun effet additionnel des ingestions couplées de CHO + GUAc ou de CHO + CAF n'est indiqué sur le RPE ($F(4, 32) = 1.56$, $p = .21$, $\eta p^2 = .16$). Il est aussi suggéré une détérioration de la performance de tir après l'exercice qui n'est pas contrecarrée par l'ajout d'une supplémentation nutritionnelle. Enfin, aucun effet de la nutrition n'est indiqué sur la fréquence cardiaque.

Title of the article: Does ingestion of nutritional supplements during exercise enhance cognitive performance in high level athletes?

Submission type: Original investigation

Full names of the authors and institutional/corporate affiliations

Laura Pomportes[1,2,4], Jeanick Brisswalter[1], Arnaud Hays[3], Karen Davranche[4]

[1]Université Côte d'Azur, Laboratoire Motricité Humaine Expertise Sport Santé, Nice, France.
[2] CREPS PACA, Aix en Provence, France.
[3]Aix-Marseille Université, UMR 7287. Institut des Sciences du Mouvement, Marseille, France.
[4]Aix-Marseille Université, CNRS, LPC, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille, France.

Contact details for the corresponding author:

Karen Davranche,
Aix-Marseille Université,
UMR7290, Case D, 3 Place Victor Hugo, 13003, Marseille, France.
karen.davranche@univ-amu.fr
+33(0)413551135

Preferred running head: Exercise, Nutrition and Cognition

Abstract word count: 254

Text-only word count: 3881

Numbers of figures and tables: 8 (7 figures and 1 table)

Abstract

Purpose: The aim of this study was to examine the effect of carbohydrate (CHO), caffeine (CAF) and a guarana complex (GUAc) ingestion during a running exercise on cognitive performance, perceived exertion (RPE) and shooting performance in Modern Pentathlon National Team. **Methods:** Ten athletes completed within a 2 weeks-period four counterbalanced sessions, corresponding to ingestions in a single-blind of CHO (30 g, 6%), GUAc (300 mg), CAF (200 mg) or placebo (PL). The exercise involved a 40-minutes run on a treadmill at steady speed, previously determined to a "somewhat hard" exercise (RPE 13). Shooting performance and cognitive performance (Simon reaction time task) were assessed 1) prior to exercise and ingestion, 2) prior to exercise and after half ingestion, 3) after exercise and full ingestion. Supplements were consumed 40 and 5 minutes prior exercise, and after 20 minutes of run. RPE was assessed every 10 minutes of exercise. **Results:** Results have shown an interaction between drinks and exercise on reaction time ($p = .01$, $\eta p^2 = .41$) and on RPE ($p = .03$, $\eta p^2 = .31$). CHO, CAF and GUAc enhanced the speed of information processing after exercise (respectively $p = .003$, $p = .004$ and $p = .04$) but only CAF and GUAc decreased RPE during exercise (respectively $p = .01$, $p = .03$). No effect of supplementation was found on shooting performance. **Conclusions:** Our results come through the possible ergogenic effects of nutritional supplements on information processing and on RPE. This finding is particularly interesting since decision-making processes are fully involved in many sports performance.

Keywords: Exercise, Nutrition, Inhibition processes, RPE, Shooting performance, Modern Pentathlon athletes

Introduction

In many sports, successful performance requires filtering relevant information and selecting actions consistent with current goals. Performance is directly linked to the athlete's capacity to simultaneously handle physiological and cognitive loads. Modern Pentathlon is one of these disciplines where athletes are faced with physiological and cognitive requirements, as pentathletes need to provide accurate and appropriate responses under time pressure. This Olympic sport involves five events all completed in a single day, including swimming, horse riding, fencing, and a combined event of pistol shooting and running. An optimal cognitive functioning stands out as a preponderant factors notably in the fencing event, which is a duelling event involving quick and accurate decision-making. But efficiency of cognitive functioning is also a central component of the combined events since athletes have to complete four pistol shooting series, interspaced by 800 m runs[1]. During this event, irrelevant stimuli such as noise, nearby competitors and lighting represent potential distractors which could affect shooting performances.

Within this framework, it has been well documented that moderate exercise improves cognitive performance whereas heavy or prolonged exercise could lead to a decrease[2]. Recent studies have indicated that nutritional supplements could help limit central fatigue[3] possibly related to brain neurotransmitters disturbances[4], and maintain cognitive abilities during exercise[5,6]. All of these effects would be due to a modification of cerebral physiological state. These include carbohydrate (CHO) and caffeine (CAF), which are commonly consumed by athletes for their ergogenic effects on endurance performance and more recently on cognitive function (for review see[3]). Currently, there is also a growing interest for guarana, commonly consumed associated to multimineral complex and to ginseng (GUAc). Guarana ingestion has been reported to enhance cognitive functioning at rest[7,8] and during exercise[9], possibly due to a number of potential stimulants such as caffeine, flavonoids, saponins or tannins[10,11].

Cognitive functions represent a huge field of research. In the present study we investigated executive function, which in a broad sense refers to several processes essential for our adaptability in an ever-changing environment. Among the variety of them, we focused specifically on inhibition processes which can be defined by the ability to inhibit inappropriate actions[12].To date, very few studies have investigated the effect of nutritional supplements on inhibition processes even though they are decisive in sporting performance. Some research suggest that CAF ingestion could enhance executive function and more specifically inhibition processes at rest, possibly through an antagonism action of A_1 and A_{2a} adenosine receptors leading to an indirect increase of dopamine availability in brain regions mediating executive control[13]. But to our knowledge, no study investigated the effect of CAF ingestion on inhibition processes at the end of exercise. Similarly, a recent study has shown an improvement of inhibition processes, after GUAc ingestion at rest[8]. Lastly, if CHO has been shown to induce beneficial effects on physical performance even during short exercise (< 1 hour) through central mechanisms[14,15], to our knowledge, no study has investigated the effect of CHO intake on inhibition processes at the end of exercise.

The main purpose of the present study was to assess, in high level Modern Pentathlon athletes, the effect of CAF, CHO and GUAc ingestion on inhibition processes and shooting performance. We also investigated the effect of these three nutritional supplements on perceived exertion (RPE), which could be defined as "the feeling of how hard, heavy and strenuous a physical task is"[16]. Modification of RPE during exercise is particularly interesting since a decrease in rate could allow participants to produce more power with the same degree of perceived effort.

Methods

Subjects

Twelve athletes of the Modern Pentathlon National Team took part in the present study (Table 1). All participants were intensely engaged in training (~25 hours per week) and competed at international level. Due to injuries during the experimental period, only ten athletes (6 males and 4 females) were included in the present results. Participants were not currently using nutritional supplements during training or competition and consumed less than 100 mg of caffeine per day. Before inclusion, the experimental procedure was explained to the participants and they signed an informed consent form approved by the Ethics Committee (Ile de France, VII, Saint Germain en Laye, France).

Design

This study used a pseudo counter-balanced design and required participants to visit the laboratory five times.

One week before the experimental sessions, participants performed a preliminary session in order to collect physiological and anthropometric characteristics. Additionally subjects were required to determine a treadmill running speed which corresponds to a perception of "somewhat hard" exercise, identified on the Borg 6-20 category scale[17] by a 13 RPE. Recent studies have provided a strong evidence for the efficiency of RPE 13 to self-regulate training over a long period[18]. After a 5 minutes warm up at 8.5 $km.h^{-1}$ for female and 10.5 km $.h^{-1}$ for male, running speed was increased by 0.5 $km.h^{-1}$ every 4 minutes and participants verbally reported the number that reflected how hard they were running, ranging from no exertion at all (6), somewhat hard (13) to maximal effort (20). Running speed was increased until the subjects achieved a level of RPE 13. Additionally, they were excluded from receiving any feedback during the exercise.

The four experimental sessions were performed within two weeks, separated at least by 72 hours, and conducted at the same time of the day for each subject. Each experimental session lasted approximately 120 minutes and was counterbalanced between participants. They were instructed to keep a food diary during the day prior to the first session and to replicate this diet before each session. They were also required to refrain from alcohol, caffeine, pain medication and to control their time and hours of sleep the 48 hours prior to each experimental session. Except water, any ingestion was prohibited in three hours before the start of the experimental session. Training loads of athletes were replicated in the 48 hours between each session, in order to replicate a similar physiological strain. So as to facilitate digestion processes and to reproduce athlete's consumption habits, ingestion of nutritional supplements was splitted in three ingestions: two before exercise and one during exercise. Each experimental session started with a short recall of the Simon task followed by a pistol shooting performance, a first block of the Simon task and the ingestion in a single-blind manner of 250 millilitres (ml) of drink. Then subjects were invited to remain calm in a quiet room for 25 minutes. Fifteen minutes before the start of exercise, subjects performed pistol shooting, a second block of Simon task and ingested 125 ml of the same drink. Then, participants started a constant-workload 40-minutes run at the speed corresponding to RPE 13 previously determined. Heart rate values were continuously recorded during exercise using Polar RS800 cardio-frequencemeter (Polar Electro, Kempele, Finland). RPE was assessed at 10, 20, 30 and 40 minutes of exercise. A further 125 ml drink was administered after 20 minutes of running and after RPE assessment. Immediately at the end of exercise, subjects performed a pistol shooting followed by a third block of the Simon task. Measurements of lactatemia (lactate Pro II, Arkay, Kyoto, Japan) were taken from a capillary blood of the fingertip before and 2 minutes after exercise (Figure 1).

Inhibition processes and shooting performance were thus assessed three times during each experimental session: prior exercise/prior ingestion (block 1, B1), prior exercise/after half ingestion (block 2, B2) and after exercise/after full ingestion (block 3, B3).

Experimental sessions differed only by the composition of the drink ingested, prepared by the experimenter, of either: a 6% carbohydrate complex (CHO: fructose (89%) and maltodextrin (11%), ISOXAN® Sport Pro, NHS, Rungis, France), a 200 milligrams (mg) caffeine (CAF: PROLAB® nutrition, Chatswoth, USA) added with orange sugarless syrup, a 3.4 grams (g) guarana complex (GUAc: 300 mg of guarana + 100 mg ginseng + 180 mg vitamins C, Isoxan Actiflash® Booster, NHS, Rungis, France), or a placebo (PL: tap water added with orange sugarless syrup). Tap water was provided ad libitum during the exercise.

Methodology

Cognitive performance

Inhibition processes were assessed using the Simon reaction time task[12]. For details about the learning criteria please see[6]. Participants were sitting right across a computer screen placed at 1 meter away, with two response keys on their right and left hands. In the Simon task, participants were required to respond, as quickly and accurately as possible, by pressing the appropriate response key (with the right or left thumb finger) according to the shape (square or circle) of a geometric symbol delivered either to the left or to the right of the fixation point. Participants had to select the task-relevant feature of the stimulus (the shape) and inhibit the surrounding task-irrelevant feature (the spatial location). The task included 80 trials divided in two equiprobable trial types randomized: the congruent trials (response side ipsilateral to the stimulus side), and the incongruent trials (response side contralateral to the stimulus side). During the Simon task, performance expressed both in terms of mean reaction time (milliseconds, ms) and error rate (%), is usually reported to be better when the relevant and irrelevant information correspond to the same response than when they are mapped to different responses. This effect is known as the “Simon effect” or “interference effect” in the literature. The emergence of a conflict between the activation of the incorrect response (associated to the irrelevant information) and the activation of the correct response (associated to the relevant information) is thought to be at the origin of the performance impairment[19].

Pistol performance

Pistol shooting was performed in a quiet room, near the experimental room. Participants were required to shoot with his/her own pistol, held with only one hand, in a standing position behind the firing line located 10 meters away from the electronic targets. The two electronic targets (Hit target, Simpower©) were composed by one black single aim and five green/red lights indicating the success or failure ensuing to the shoot. Participants were required to shoot down five targets on the two electronic boxes, as fast as possible. Shooting time (i.e. the delay between the first and the last shoot) and accuracy (i.e. percentage of success in hitting the ten targets during each pistol shooting sessions) were computed.

Statistical analysis

All variables were expressed as mean ± standard deviation (mean ± SD) except for cognitive task which were expressed as mean ± standard errors (mean ± SE). Statistical analysis was performed using a repeated measures ANOVA (Statistica, Statsoft©, version 13). A first analyze (B1 vs B2) was performed to assess the effect of nutritional supplements on shooting performance and on cognitive performance at rest. Shooting performance was assessed using respectively a two-way ANOVA (4 × 2) with factors drinks (PL vs CHO vs GUAc vs CAF) and ingestion (pre vs post ingestion). Cognitive performance was assessed

using a three-way ANOVA (4 × 2 × 2) with factors drinks, ingestion and congruency (congruent vs incongruent).

A second analyze (B2 vs B3) was performed to assess the interaction between exercise and nutritional supplements. A two-way ANOVA (4 × 4) was conducted on mean heart rate with factors drinks and exercise duration (10 min vs 20 min vs 30 min vs 40 min). Shooting performance and lactatemia were assessed using a two-way ANOVA (4 × 2) with factors drinks and exercise (pre vs post exercise). Cognitive performance was assessed using a three-way ANOVA (4 × 2 × 2) with factors drinks, exercise and congruency. Subjective perceived exertion analyses were conducted using a two-way ANOVA (4 × 2) with factors drinks and exercise duration (10 min vs 40 min). Post-hoc Newman-Keuls tests were conducted for all significant effects. Effect sizes were calculated using partial eta square (ηp^2). Values of: 0.01, 0.06 and over 0.14 were respectively considered as small, medium and large effect[20]. For univariate repeated-measure ANOVA tests involving more than one degree of freedom, the Greehouse-Geisser correction was conducted. In this case, the corrected degrees of freedom and p-value were reported. The level of significance was set at $p < .05$.

Results

Nutritional supplements at rest

Shooting performance

Results did not revealed any effect of ingestion or interaction between drinks and ingestion on shooting time (respectively $p = .81$, $\eta p^2 = .01$ and $p = .47$, $\eta p^2 = .09$) and on shooting accuracy ($p = .70$, $\eta p^2 = .02$ and $p = .26$, $\eta p^2 = .14$).

Cognitive performance

Results showed a large effect of congruency on mean reaction time, $F(1, 9) = 86.5$, $p < .001$, $\eta p^2 = .91$ (congruent = 334 ± 7 ms vs incongruent = 356 ± 7 ms) and on errors rate, $F(1, 9) = 15.5$, $p = .003$, $\eta p^2 = .63$ (congruent = 2 ± 0.4% vs incongruent = 4 ± 0.4%). No interaction between drinks and ingestion was found on mean reaction time ($p = .45$, $\eta p^2 = .09$) and on errors rate, ($p = .79$, $\eta p^2 = .03$).

Interaction between exercise and nutritional supplements

Physiological parameters

Treadmill running velocity for the 40-minutes exercise was 12.1 ± 1 $km.h^{-1}$ (female : 10.7 ± 1; male: 13.3 ± 1) and mean heart rate was 162 ± 1 bpm corresponding to 83 ± 5% of theoretical maximal heart rate[21]. Results highlight a large exercise effect of mean heart rate, $F(1, 10) = 45.8$, $p < .001$, $\eta p^2 = .83$. No interaction drinks x exercise was found, $F(2, 19) = 2.9$, $p = .08$, $\eta p^2 = .25$ suggesting that exercise did not impact mean heart rate differently in function of drink ingested (Figure 2). No effect of exercise on lactatemia was found, $F(3, 24) = 0.5$, $p = .66$, $\eta p^2 = .06$ suggesting the strictly aerobic solicitation of exercise.

Perceived exertion

A large effect of exercise was found on RPE, $F(1, 9) = 21.3$, $p < .001$, $\eta p^2 = .70$ suggesting an increase of RPE between 10 and 40 minutes of exercise. An interaction between drinks and exercise was observed, $F(2, 21) = 4.1$, $p = .03$, $\eta p^2 = .31$. Newman-Keuls highlighted an increase of RPE between 10 and 40 minutes for each drinks: PL ($\Delta = +3$, $p < .001$, CHO ($\Delta = +3$, $p < .001$), GUAc ($\Delta = +2$, $p < .001$), and CAF = ($\Delta = +2$, $p < .001$). Furthermore, the increase in RPE with exercise was significantly smaller for CAF, $F(1, 9) = 9.0$, $p = .01$ and GUAc, $F(1, 9) = 6.6$, $p = .03$ when compared with PL (Figure 3).

Shooting performance

A large negative effect of exercise on shooting performance was observed on time (Δ = +7 s) and accuracy (Δ = -10%), respectively, $F(1, 9) = 6.9$, $p = .03$, $\eta p^2 = .44$ and $F(1, 9) = 10.6$, $p = .01$, $\eta p^2 = .54$. No significant interaction between drinks and exercise was observed on shooting time ($p = .16$, $\eta p^2 = .19$) or accuracy ($p = .23$, $\eta p^2 = .15$) suggesting that nutrition do not run counter deleterious effects of exercise (Figures 4A and 4B).

Cognitive performance

Mean RT

Analysis revealed a large effect of congruency, $F(1, 8) = 188.0$, $p < .001$, $\eta p^2 = .96$ (congruent = 327 ± 7 ms vs incongruent = 353 ± 7 ms) and an interaction between drinks and exercise, $F(2, 17) = 5.5$, $p = .01$, $\eta p^2 = .41$ on mean reaction time. Newman-Keuls did not revealed a significant change of mean reaction time after exercise compared to before exercise with PL ingestion ($p = .84$), whereas a significant decrease of reaction time after exercise was observed with CHO (Δ = -20 ms, $p = .003$), GUAc (Δ = -11 ms, $p = .04$) and CAF (Δ = -20 ms, $p = .004$) ingestions (Figure 5A).

No significant interaction between exercise and congruency ($p = .57$, $\eta p^2 = .04$) or between drinks, exercise and congruency ($p = .41$, $\eta p^2 = .10$) was observed on mean reaction time, suggesting that neither exercise nor nutritional supplements modified the magnitude of the interference effect and so influence inhibition processes.

Errors rate

A large effect of congruency, $F(1, 9) = 33.4$, $p < .001$, $\eta p^2 = .79$ (congruent = 2.5 ± 0.4% vs incongruent = 3.9 ± 0.4%) and an interaction between drinks and exercise, $F(3, 23) = 3.4$, $p = .04$, $\eta p^2 = .27$ were observed on errors rate. Newman-Keuls did not reveal a significant difference in errors rate for each drinks before and after exercise: CAF ($p = .30$), CHO ($p = 1.0$), PL ($p = .10$) and GUAc ($p = .06$). Furthermore a larger decrease of errors rate with GUAc compared to PL was found after exercise, $F(1, 9) = 8.2$, $p = .02$ (Figure 5B).

No significant interaction between exercise and congruency ($p = .71$, $\eta p^2 = .01$) or between drinks, exercise and congruency ($p = .06$, $\eta p^2 = .24$) was observed on errors rate.

Discussion

The present study was conducted to assess the influence of nutritional strategies on cognitive performance, shooting performance and perceived exertion. To this aim, ten high level Modern Pentathlon athletes have been required to ingest CHO, CAF and GUAc drinks before and during a 40-minutes submaximal run. Inhibition processes and shooting performance have been assessed prior and after exercise and RPE was measured every 10 minutes while exercising. The most important findings were: (i) CAF and GUA ingestion led to a decrease in perception of effort compared to PL; (ii) CHO, CAF and GUAc enhanced the speed of information processing compared to PL; (iii) nutritional supplements did not improve inhibition processes and shooting performance.

As expected, prolonged exercise leads to an increase in a RPE. However, our results indicate that both CAF and GUAc ingestion could attenuate perception of effort rising during exercise which is interesting since RPE has been used to explain changes in pace and pacing strategy[18]. Beneficial effects of CAF on RPE have already been shown[22] and expounded through central nervous system involvement. A possible explanation for the caffeine-induced reduction in RPE for unchanged muscle activation, is the attenuation of premotor and motor areas activities reflected by the decrease in the amplitude of the motor-related cortical potential[23]. It has been proposed that dopamine and adenosine system could interact in the brain, possibly in the nucleus accumbens, creating a greater dopaminergic drive involved in

regulating behavioral activation and motivation[24]. Similarly we observed that GUAc ingestion has also a positive effect on RPE increase when compared to PL, which is in line with a recent study[9] investigating the effect of a similar GUAc ingestion on RPE during a 30-minutes run. The possible mechanism of guarana on RPE remains unknown, but previous authors suggest that the psychoactive properties of guarana may be attributable to high content of other psychoactive components than caffeine, including both saponins and tannins[10]. Lastly, we failed to report any beneficial effect of CHO on RPE during exercise. Several studies had previously highlighted the beneficial effect of CHO ingestion during prolonged exercise[25,26] but effects appeared to be significant only from 75-minutes of a 2 hours cycling exercise. If RPE enhancement in prolonged exercise suggests an increase of substrate availability with CHO consumption, to date, mechanisms and effects on shorter exercise (~1 hour) are more equivocal. Concerning heart rate, our results highlight that exercise leads to an increase of mean heart rate which is not modified in function of drinks ingested. In this study, ingestions of low doses of CAF (200 mg) and GUAc seems to be innocuous on cardiac functioning.

One another interesting result is that, reaction time is shorter after CHO, GUAc and CAF ingestions compared to PL which suggests an increase of the speed of information processing. Several studies have shown a beneficial effect of CHO ingestion on cognitive functions during a prolonged exercise (> 2 hours) leading to both central and peripheral fatigue[3] but results on shorter exercise (<1 hour) are less conclusive. One hypothesis raised by recent mouth rinsing studies indicates that the beneficial effect of CHO during exercise < 1 hour may be mediated by central neural response from an oral CHO stimulus which can influence activation of different brain areas and influence emotion and behaviour[6,27]. Research studies investigating inhibitory processes suggest that CAF could have positive influences on inhibition processes at rest and reduces interference costs[13,28] whereas other investigation, did not find any beneficial effect of caffeine on a variety of inhibitory tasks [29]. Our results highlighted an enhancement of speed of information processing but no effect of nutritional supplements was found on inhibition processes. Very few studies have evaluated the effect of CAF ingestion on inhibition task during exercise. Using the Stroop task, Hogervorst et al.[30] found an improvement of information processing in terms of speed, with CAF bars ingestion compare to both CHO and PL from 70 minutes of exercise. However, effects on inhibition processes require to be further investigated. Likewise, our results highlight the beneficial effect of GUAc on information processing after exercise with no effect on inhibition processes. To date, very few study investigated the effect of GUAc ingestion on cognitive function during exercise and neither on inhibition processes. In a recent study, Veasey et al.[9] highlighted an increase in accuracy of numeric working memory and in speed of picture recognition after exercise when compared to PL. Even if mechanisms explaining guarana effects remain unclear, taking together, these results suggest that GUAc ingestion could be an interesting nutritional strategy to enhance cognitive function even if effects on inhibition processes at the end of exercise remains restricted.

Lastly, in this study we failed to observe any improvement or effect on shooting performance. In our well trained subjects, 40-minutes exercise leads to a decrease in shooting performance but no effect of CHO, CAF and GUAc ingestion was found. Like for all fine motor coordination, shooting performance is extremely sensitive to various factors. A large variability in the shooting performance was observed for athletes throughout baselines sessions, which possibly affected the magnitude effect. Furthermore, the low sample size, likewise a lot for this specific population, could be insufficient to highlight this effect. It could have been interesting to also assess the effect of nutritional supplements on some selective components of a successful shooting performance such as postural balance and pistol stability, which may be predictive of performance enhancement[31].

Practical Applications

For athletes who have to simultaneously perform decision-making processes with a high physiological load, CHO or more specifically GUAc and CAF ingestion would be useful to enhance cognitive abilities during competition. It is appropriate to consider that a large variability in the magnitude of response ingestion has already been shown, and it is clearly necessary to previously test any nutritional supplement in order to determine the athlete's response. Furthermore, even if some benefits have been related on cognitive functioning with moderate amounts of caffeine (~ 3 $mg.kg^{-1}$ body mass)[32], some side effects like dizziness, headache, nervousness, insomnia, and gastrointestinal distress have been related in subject presenting caffeine intolerance (for review see[33]) and/or with consumption of higher doses than that advocated of 200 mg. These potential health effects should be taken into account in the development of individual nutritional supplements strategy.

Conclusions

In addition to the beneficial effect of nutritional supplements on physical performance previously highlighted in the literature[34], our results come through the possible ergogenic effects of CHO on information processing and of CAF and GUAc on both, perception of effort and information processing. This finding is particularly interesting since decision-making processes are fully involved in many sports performances, including multi-events competition.

.

Acknowledgements

The authors wish to thank the CREPS PACA, the French Squash Federation and the French Federation of Modern Pentathlon for supporting the project, and especially coach Cédric Maillard and all the young pentathlon athletes who participated in this study. We also thank Laurence Casini for helping with the data analysis.

References

1. Le Meur, Y., Dorel, S., Baup, Y., Guyomarch, J. P., Roudaut, C., & Hausswirth, C. (2012). Physiological demand and pacing strategy during the new combined event in elite pentathletes. *European Journal of Applied Physiology*, *112*(7), 2583–2593. https://doi.org/10.1007/s00421-011-2235-2.
2. Brisswalter, J., Collardeau, M., & René, A. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *32*(9), 55–566.
3. Meeusen, R. (2014). Exercise, Nutrition and the Brain. *Sports Medicine*, *44*(S1), 47–56. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0150-5
4. Davis, J.M. (1995). Carbohydrates, branched-chain amino acids, and endurance: the central fatigue hypothesis. *Int. J. Sport Nutr*. *5*, 29-38.
5. Collardeau, M., Brisswalter, J., Vercruyssen, F., Audiffren, M., & Goubault, C. (2001). Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: influence of carbohydrate availability. *European Journal of Applied Physiology*, *86*(2), 150–156. https://doi.org/10.1007/s004210100513
6. Pomportes, Laura, Brisswalter, J., Casini, L., Hays, A., & Davranche, K. (2017). Cognitive Performance Enhancement Induced by Caffeine, Carbohydrate and Guarana Mouth Rinsing during Submaximal Exercise. *Nutrients*, *9*(6), 589. https://doi.org/10.3390/nu9060589

7. Kennedy, D. O., Haskell, C. F., Robertson, B., Reay, J., Brewster-Maund, C., Luedemann, J., Scholey, A. B. (2008). Improved cognitive performance and mental fatigue following a multi-vitamin and mineral supplement with added guaraná (Paullinia cupana). *Appetite*, *50*(2–3), 506–513. https://doi.org/10.1016/j.appet.2007.10.007

8. Pomportes, L., Davranche, K., Brisswalter, I., Hays, A., & Brisswalter, J. (2014). Heart Rate Variability and Cognitive Function Following a Multi-Vitamin and Mineral Supplementation with Added Guarana (Paullinia cupana). Nutrients, 7(1), 196–208. https://doi.org/10.3390/nu7010196

9. Veasey, R., Haskell-Ramsay, C., Kennedy, D., Wishart, K., Maggini, S., Fuchs, C., & Stevenson, E. (2015). The Effects of Supplementation with a Vitamin and Mineral Complex with Guaraná Prior to Fasted Exercise on Affect, Exertion, Cognitive Performance, and Substrate Metabolism: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients*, *7*(8), 6109–6127. https://doi.org/10.3390/nu7085272

10. Scholey, A., & Haskell, C. (2008). Neurocognitive effects of guaraná plant extract. Drugs of the Future, 33(10), 869.

11. Espinola, E. B., Dias, R. F., Mattei, R., & Carlini, E. A. (1997). Pharmacological activity of Guarana (Paullinia cupana Mart.) in laboratory animals. *Journal of Ethnopharmacology*, *55*(3), 223–229.

12. Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory SR compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, *51*(3), 300.

13. Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., Lieberman, H. R., & Taylor, H. A. (2010). Caffeine modulates attention network function. *Brain and Cognition*, *72*(2), 181–188. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.07.013.

14. Jeukendrup, A., Brouns, F., Wagenmakers, A. J. M., & Saris, W. H. M. (1997). Carbohydrate-electrolyte feedings improve 1 h time trial cycling performance. *International Journal of Sports Medicine*, *18*(02), 125–129.

15. Carter, J. M., Jeukendrup, A. E., Mann, C. H., & Jones, D. A. (2004). The Effect of Glucose Infusion on Glucose Kinetics during a 1-h Time Trial: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *36*(9), 1543–1550. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000139892.69410.D8

16. Pageaux, B. (2016). Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. *European Journal of Sport Science*, *16*(8), 885–894. https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1188992

17. Borg, G. (1985). *An introduction to Borg's RPE-scale*. Ithaca, N.Y. : Mouvement Publications. Retrieved from http://trove.nla.gov.au/version/45253441

18. Eston, R. (2012). Use of ratings of perceived exertion in sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *7*(2), 175–182.

19. Kornblum, S., Hasbroucq, T., Osman, A. (1990). Dimensional overlap: cognitive basis for stimulus-response compatibility—a model and taxonomy. *Psychological Review*, *97*(2), 253-270.

20. Cohen, J. (1988). *Statistical Power analysis for the behavioural sciences.* (2nd ed.) Hillsdale, NJ: Erlbaum.

21. Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, *37*(1), 153–156.

22. Doherty, M., & Smith, P. M. (2005). Effects of caffeine ingestion on rating of perceived exertion during and after exercise: a meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *15*(2), 69–78. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2005.00445.x

23. Moree, H. M., Klein, C., Marcora, S. M. (2014). Cortical substrates of the effects of caffeine and time-on-task on perception of effort. *Journal of Applied Physiology, 117(12*), 1514-1523. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00898.2013.

24. Meeusen, R., Roelands, B., & Spriet, L. L. (2013). Caffeine, exercise and the brain. *Limits of Human Endurance*, *76*, 1–12.

25. Backhouse, S. H., Bishop, N. C., Biddle, S. J. H., & Williams, C. (2005). Effect of Carbohydrate and Prolonged Exercise on Affect and Perceived Exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *37*(10), 1768–1773. https://doi.org/10.1249/01.mss.0000181837.77380.80

26. Utter, A. C., Kang, J., Nieman, D. C., Dumke, C. L., Mcanulty, S. R., Vinci, D. M., & Mcanulty, L. S. (2004). Carbohydrate Supplementation and Perceived Exertion during Prolonged Running: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *36*(6), 1036–1041. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000128164.19223.D9

27. De Pauw, K., Roelands, B., Knaepen, K., Polfliet, M., Stiens, J., & Meeusen, R. (2015). Effects of caffeine and maltodextrin mouth rinsing on P300, brain imaging, and cognitive performance. *Journal of Applied Physiology*, *118*(6), 776–782. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01050.2014

28. Kenemans, J. L., Wieleman, J. S., Zeegers, M., & Verbaten, M. N. (1999). Caffeine and stroop interference. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, *63*(4), 589–598.

29. Tieges, Z., Snel, J., Kok, A., & Richard Ridderinkhof, K. (2009). Caffeine does not modulate inhibitory control. *Brain and Cognition*, *69*(2), 316–327. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.08.001

30. Hogervorst, E., Bandelow, S., Schmitt, J., Jentjens, R., Oliveira, M., Allgrove, J., Gleeson, M. (2008). Caffeine Improves Physical and Cognitive Performance during Exhaustive Exercise: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *40*(10), 1841–1851. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817bb8b7

31. Mononen, K., Konttinen, N., Viitasalo, J., & Era, P. (2006). Relationships between postural balance, rifle stability and shooting accuracy among novice rifle shooters. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *0*(0), 061120070736055–??? https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2006.00549.x

32. Burke, L. M. (2008). Caffeine and sports performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *33*(6), 1319–1334. https://doi.org/10.1139/H08-130

33. Sökmen, B., Armstrong, L. E., Kraemer, W. J., Casa, D. J., Dias, J. C., Judelson, D. A., & Maresh, C. M. (2008). Caffeine use in sports: considerations for the athlete. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *22*(3), 978–986. https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181660cec

34. Jeukendrup, A.E. (2011). Nutrition for endurance sports: Marathon, triathlon, and road cycling. Journal of *Sports Sciences*, *29*(1), 91-99.

Table 1: Anthropometric and physiological characteristics of participants.

Mean (Standard deviation)			
Variables	**All**	**Female**	**Male**
Sample size	10	4	6
Age (years)	18.6 (2)	18.9 (2)	18.5 (3)
Height (cm)	173 (11)	168 (12)	176 (11)
Body Mass (kg)	60.9 (9)	56.5 (9)	63.8 (11)
Fat mass (%)	13.3 (5)	19.5 (6)	9.20 (5)
Heart rate max (bpm)	195 (2)	195 (2)	195 (2)
Running Speed RPE 13	12.2 (1)	10.7 (1)	13.3 (1)

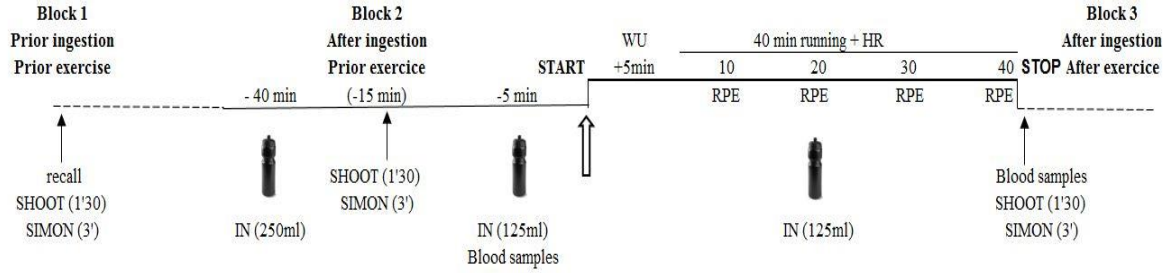

Figure 1: General procedure of each experimental session (recall = recall of the Simon task; SHOOT = pistol shooting; SIMON = Simon task; IN = ingestion of drink; WU = warm up; HR = heart rate record; RPE = rating of perceived exertion).

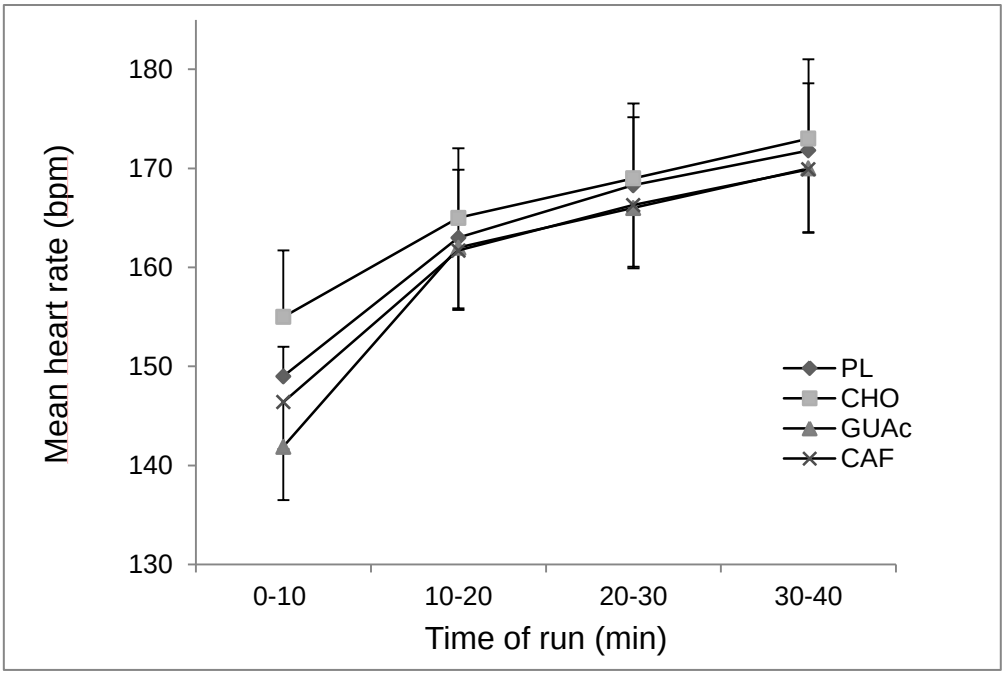

Figure 2: Effect of exercise duration on mean heart rate in function of nutritional supplements. Errors bars represent standard deviation of the mean divided per two.

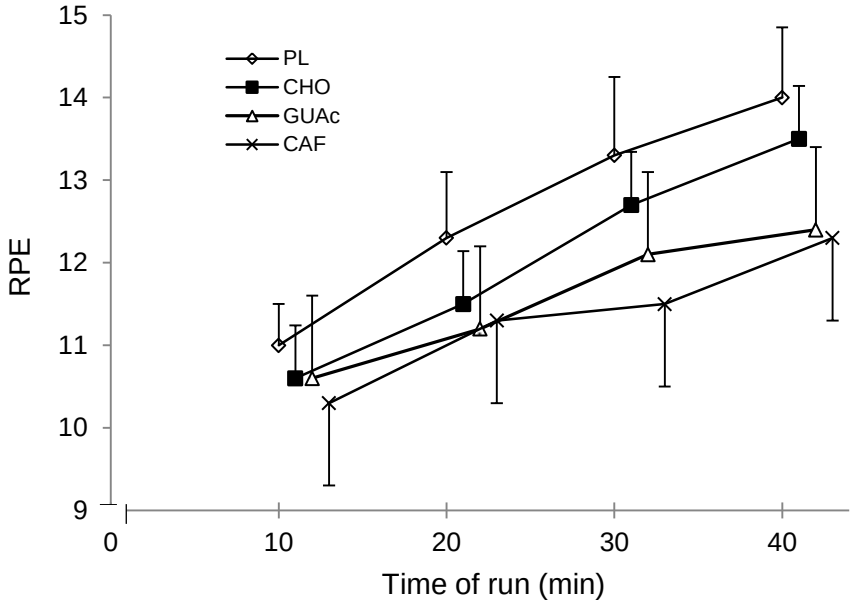

Figure 3: Effect of exercise duration on RPE in function of nutritional supplements. Errors bars represent standard deviation of the mean divided per two. Mean running speed at RPE13 was 12.2 ± 1 km.h^{-1}.

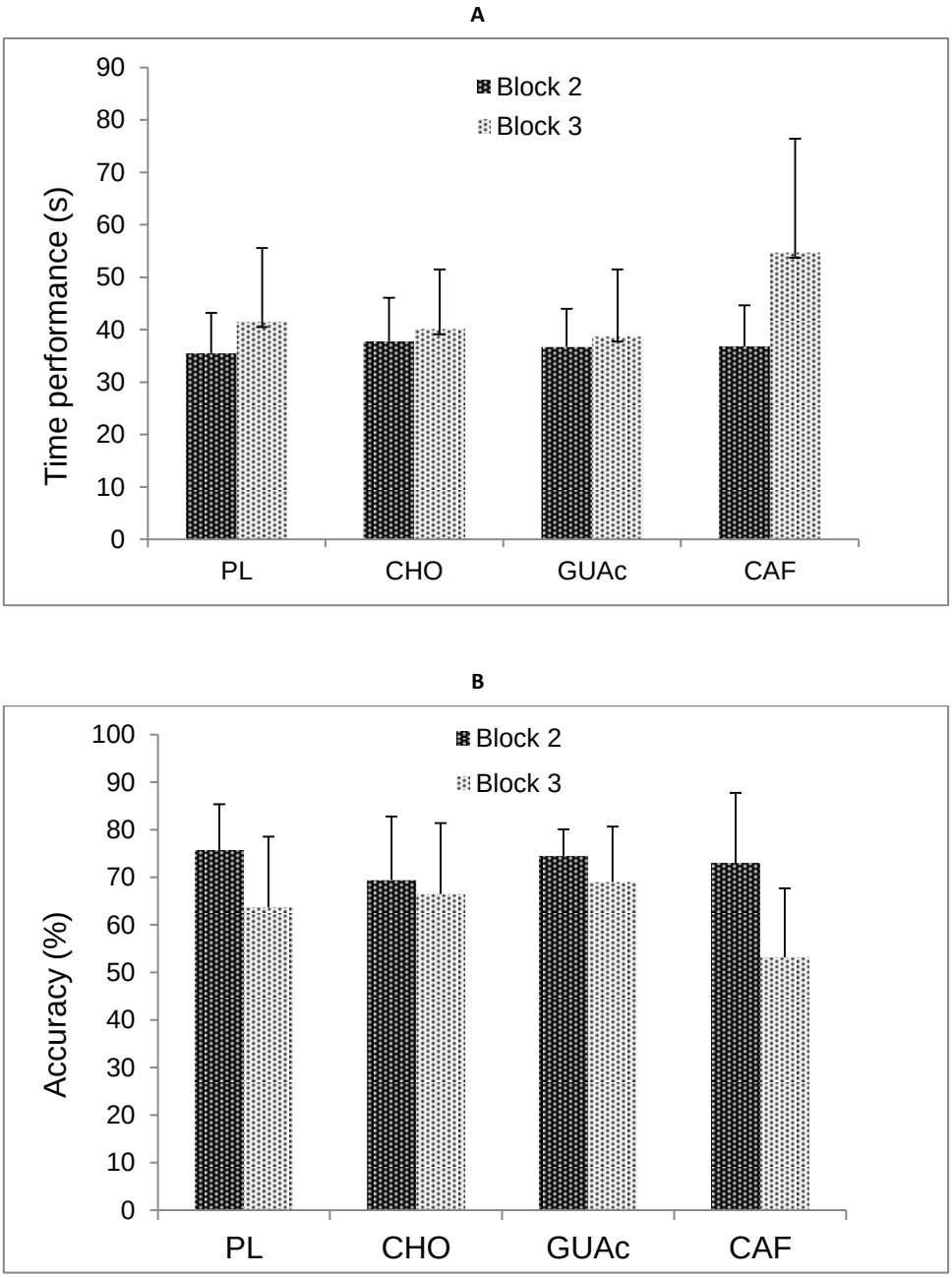

Figure 4: Effect of nutritional supplements on A) time performance and B) accuracy for the shooting task, before exercise (block 2) and after exercise (block 3). Errors bars represent standard deviation of the mean.

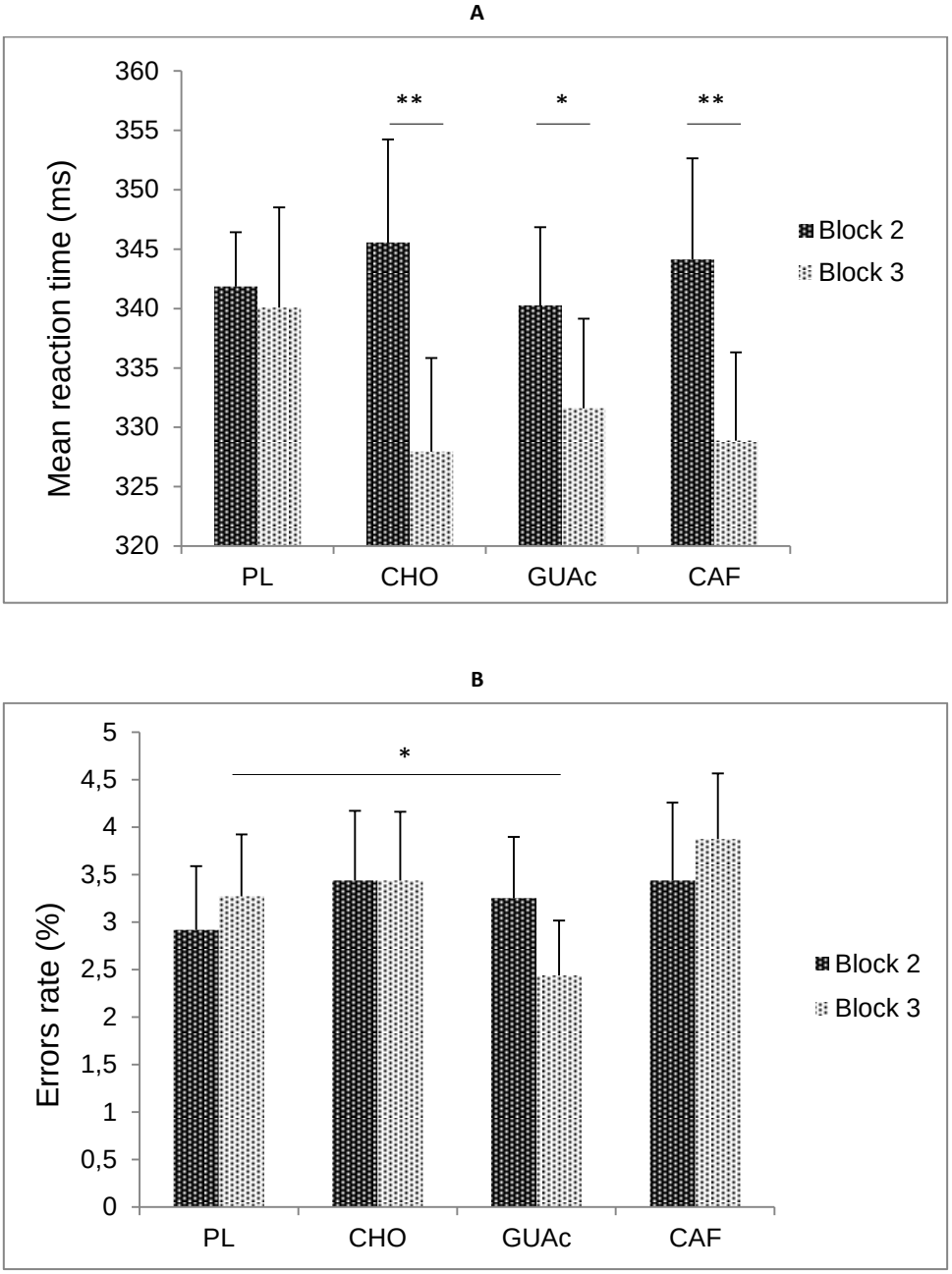

Figure 5: Effect of nutritional supplements on A) mean reaction time (RT) and B) errors for the Simon task, before exercise (block 2) and after exercise (block 3). Errors bars represent standard errors of the mean. * $p < .05$, ** $p < .01$.

TROISIEME PARTIE :

DISCUSSION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse était d'investiguer les effets de trois supplémentations nutritionnelles, connues pour leurs actions psychostimulantes et classiquement consommées par les sportifs, sur le fonctionnement cognitif au cours d'une sollicitation physiologique. Dans cette optique de recherche, quatre protocoles expérimentaux ont été réalisés au cours desquels les effets d'hydrates de carbone, de caféine et d'un complexe de guarana ont été mesurés sur des indices de performance physique, sur la perception de l'effort, ainsi que sur plusieurs processus cognitifs. Dans ce cadre, l'efficacité du traitement de l'information sensorimotrice lors de tâche de TRS et de TRC, ainsi que le contrôle de l'interférence ont été appréhendés grâce au paradigme de la chronométrie mentale. Par ailleurs, le traitement temporel a aussi été investigué. D'une part car il s'agit d'une fonction essentielle à la motricité humaine mais aussi car ce paradigme est classiquement utilisé pour évaluer de façon indirecte les variations du niveau d'éveil.

I – Effets d'une sollicitation physiologique

Les conséquences du stress physiologique induit par la réalisation d'un exercice entraînent un certain nombre d'adaptations cognitives. Nos résultats suggèrent que l'exercice sous-maximal d'intensité modérée induit une augmentation de l'éveil dès 14 minutes d'exercice (étude n°4). Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures qui ont investigué l'effet de l'exercice sur le traitement temporel (Lambourne 2012) et sur la Fréquence Critique de Fusion pendant (Lambourne, Audiffren, et Tomporowski 2010) ou à la fin d'un exercice (Davranche et Audiffren 2004; Davranche et al. 2005; Davranche et Pichon 2005; Presland, Dowson, et Cairns 2005). Ces résultats confirment aussi les préconisations d'une durée minimale

d'exercice d'environ 20 minutes, nécessaire à l'obtention d'un effet facilitateur sur la performance cognitive (Lambourne et Tomporowski 2010).

L'effet de l'exercice sur le traitement de l'information sensorimotrice semble varier selon le type de processus investigué et la modalité de passation de la tâche cognitive. Les résultats des études n°2 et n°3 n'indiquent aucun effet de l'exercice sur le traitement de l'information lors d'une tâche de TRS. Ces résultats diffèrent d'une précédente étude ayant indiqué un effet favorable d'un exercice de pédalage de 15 minutes à 50% PMA sur la performance de ce type de tâche (Davranche et al. 2006). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces dissimilitudes. D'une part, au cours de notre étude n°2, la tâche de TRS était réalisée en post-exercice contrairement à l'étude de Davranche et al. (2006) où celle-ci était réalisée simultanément à un exercice de pédalage. Il est possible d'envisager que le délai entre la fin de l'exercice et la passation ait diminué la magnitude de l'effet. Par ailleurs, nous savons que la constatation d'un effet de facilitation est plus facilement observable lors de la prise en considération d'un grand nombre d'essais. Au cours de notre protocole expérimental, le logiciel utilisé pour la passation de cette tâche cognitive ne comptait que 10 essais par sujet et par session, ce qui est considérablement moindre que les trois blocs de 68 essais dans l'étude de Davranche et al. (2006).

Concernant les tâches décisionnelles (TRC), nos résultats indiquent un effet favorable de l'exercice sur le TR l'information que la tâche soit réalisée au cours de l'exercice (+3%, Δ = 10 ms) (étude n°4), où dès la fin de celui-ci (+3,5%, Δ = 12 ms) (étude n°5). Ces résultats sont cohérents avec certaines études précédentes qui ont indiqué un effet facilitateur de l'exercice modéré sur la vitesse de traitement de l'information lors de tâches décisionnelles de respectivement +3,5% et +4%

(Davranche et Audiffren 2004; Davranche, Brisswalter, et Radel 2015). Par ailleurs, les analyses de distribution indiquent que l'effet bénéfique de l'exercice semble être localisé sur les TR les plus longs (étude n°5), ce qui est un pattern classique de cette fonction (Luce 1986). En effet, il est communément admis que la différence de TR entre deux conditions reste proportionnelle entre les différents quantiles. La différence entre deux conditions augmente donc proportionnellement à mesure que le TR s'allonge.

Enfin, les résultats issus de nos travaux suggèrent que le contrôle de l'interférence n'est pas altéré au cours d'un exercice sous-maximal (études n°4 et n°5), ce qui est cohérent avec plusieurs études antérieures (e.g. Davranche, Hall, et McMorris 2009; Davranche, Brisswalter, et Radel 2015; Tempest et al. 2017).

II – Effets de la nutrition

L'ensemble de nos résultats indiquent que l'ingestion d'une supplémentation nutritionnelle de type hydrates de carbone, caféine ou d'un complexe de guarana n'entraîne aucun effet bénéfique sur la performance cognitive lorsque le sujet est au repos (études n°2, n°3 et n°5). Dans cette condition expérimentale, un effet bénéfique de l'ingestion d'un complexe de guarana est néanmoins indiqué dans l'étude n°1, mais uniquement lors de l'augmentation de la charge mentale induite par la répétition de la tâche.

Dans ce cadre, il est possible d'émettre l'hypothèse que l'effet bénéfique de la nutrition sur la performance cognitive s'exerce seulement lorsque le sujet n'est pas dans des conditions physiologiques optimales (charge mentale importante dans l'étude n°1 ou stress physiologique induit par l'exercice dans les études n°2, n°3 et n°5). Ce résultat apporte un argument à l'utilisation de ces stratégies nutritionnelles au cours d'un exercice.

D'une façon générale nos résultats expérimentaux valident notre hypothèse initiale selon laquelle l'utilisation de stratégies nutritionnelles peut potentialiser l'effet de l'exercice aigu sur la fonction cognitive. Nous allons détailler l'ensemble de ces adaptations de façon séquentielle dans les prochains paragraphes.

2.1. Effets de la caféine

Nos résultats expérimentaux suggèrent que l'ingestion de caféine entraîne une amélioration des processus cognitifs au cours ou dès la fin d'une sollicitation physiologique d'intensité modérée. D'une part une moindre élévation du RPE au cours de l'exercice est indiquée suite à l'ingestion de caféine comparée à la condition Pl (-8%) (étude n°5). Ce résultat est en accord avec de nombreuses études ayant montré l'intérêt de l'ingestion de caféine sur la perception de l'effort (pour revue voir McLellan, Caldwell, et Lieberman 2016). D'autre part, nos résultats indiquent une amélioration de la vitesse de traitement de l'information sensorimotrice lors de tâche décisionnelle après l'exercice d'environ +4% (Δ = 14 ms) comparé à l'effet de l'exercice seul (étude n°5). En revanche aucun effet de l'ingestion de caféine n'est indiqué sur le contrôle de l'interférence (étude n°5).

Ces résultats semblent contraster avec l'effet indiqué lors de l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche. En effet, nos résultats suggèrent un effet favorable sur le contrôle de l'interférence, qui est mis en exergue par une diminution *probable* (93%) de l'effet d'interférence au cours de l'exercice, comparé à l'ingestion du Pl (étude n°4). Spécifiquement le TR des essais congruents augmente conjointement à la diminution de celui des essais incongruents. Cet effet classique peut être expliqué par une **sur implémentation du contrôle cognitif,** impliqué dans la suppression active et rapide du traitement de l'attribut non pertinent du stimulus (Kornblum, Hasbroucq, et Osman 1990; Ridderinkhof 2002). En effet, dans la littérature, il est communément admis que lors d'une tâche de conflit, l'attribut non pertinent du stimulus (dans notre cadre la localisation spatiale) amorce une route de traitement rapide tandis que l'attribut pertinent du stimulus (la forme) active une route de traitement plus lente. Dans le cas d'un essai de type congruent, les deux routes activent la même réponse et facilitent l'émission de la réponse, tandis que lors d'un essai incongruent, l'activation simultanée de ces deux routes créée un conflit. Dans ce dernier cas, le système superviseur doit inhiber la route rapide afin que la réponse correcte puisse être concédée par la route lente. On peut supposer que si le contrôle cognitif est plus important, l'effet facilitateur induit par l'activation de la route rapide diminue, ce qui a pour conséquence d'allonger le TR des essais congruents. Au contraire la diminution du conflit entre les deux routes pour les essais incongruents entraîne une diminution du TR. Une seule étude précédente a suggéré un effet bénéfique de la caféine en rinçage de bouche sur le contrôle de l'interférence mais au repos (De Pauw et al. 2015). Il est possible d'envisager l'amélioration de ces mécanismes de contrôle comme un facteur prédictif de performance. En effet, un athlète est en permanence soumis à une multitude d'informations plus ou moins

appropriées au contexte. Sa performance est largement dépendante de sa capacité à inhiber les informations les moins pertinentes, mais aussi à inhiber l'activation de comportements moteurs qui résulteraient de ces informations inappropriées. A notre connaissance ce résultat est une première dans le champ de la recherche sportive.

Principalement en raison d'une faible taille d'échantillon, il est important de souligner que cette amélioration du contrôle de l'interférence a été indiquée par utilisation de statistiques qualitatives (Hopkins et al. 2009). Par ailleurs, afin de réaliser un protocole plus écologique et se rapprocher au maximum des conditions de compétitions des sportifs, ce protocole a été réalisé en situation postprandiale, ce qui peut considérablement diminuer la magnitude de l'effet et justifier ce choix méthodologique statistique.

A ce jour, nos données ne permettent pas de localiser l'effet de la caféine sur la chaîne de traitement sensorimotrice. Parmi les différents mécanismes explicatifs de l'effet de la caféine, l'hypothèse d'une action antagoniste à l'adénosine et d'une augmentation de la libération de neurotransmetteurs (dopamine et noradrénaline principalement), est la plus considérée dans la littérature actuelle. Dans ce cadre, il est possible d'émettre l'hypothèse que la caféine pourrait, via son effet sur le système noradrénergique, augmenter le niveau d'éveil et influer sur les étapes précoces du traitement de l'information. Par ailleurs, son effet sur le système dopaminergique pourrait augmenter le niveau d'activation et améliorer les processus tardifs d'exécution de la réponse motrice. Des recherches menées dans le cadre d'un déficit dopaminergique induit par la maladie de Parkinson ont montré qu'une supplémentation en Levodopa, un précurseur de la dopamine administré par voie

orale, entraînait d'une part une amélioration de la vitesse de traitement de l'information lors de tâches décisionnelles, mais aussi que cet effet était localisé sur les étapes précoces de détection sensorielle (Rihet et al. 2002) ainsi que sur les processus tardifs moteurs (Hasbroucq et al. 2003).

L'utilisation de la caféine en rinçage de bouche semble particulièrement intéressante dans le cadre d'une utilisation chez le sportif. D'une part car seule cette technique d'utilisation a entraîné une amélioration *probable* du contrôle de l'interférence. Même si ce résultat nécessite de plus amples recherches, il renforce notre hypothèse d'un mécanisme d'action et d'un effet sur la performance cognitive différents entre l'ingestion et le rinçage de bouche. D'autre part, l'analyse de littérature suggère que son utilisation est bénéfique pour différents types d'exercices, avec un effet plus important lors d'exercice anaérobie (anaérobie : +12,9% d'amélioration de la performance, TE = 0,47 ; aérobie +6,6% d'amélioration de la performance, TE = 0,31). Enfin, comme nous l'avons précisé précédemment, l'utilisation en rinçage de bouche préserve de fortes variations induites par des facteurs génétiques, hormonaux ou d'habitudes de consommation. Néanmoins à ce jour son utilisation ne garantit pas une absence totale d'effet secondaire puisqu'il a été indiqué que la présence de sulfate de quinine (une substance amère) dans la cavité buccale, entraînait une forte réaction du système nerveux autonome (Rousmans et al. 2000). A notre connaissance, aucune étude n'a investigué l'effet de la caféine en rinçage de bouche sur l'activité du système nerveux parasympathique.

2.2. *Effets du guarana*

L'ensemble de nos résultats suggère que l'ingestion d'un complexe de guarana multivitaminé n'affecte pas le traitement de l'information sensorimotrice lors d'une tâche de TRS au repos (étude n°1) ou après un exercice (étude n°2). En revanche, son ingestion semble bénéfique sur la vitesse de traitement de l'information lors d'une tâche de Go/Nogo au repos dès 30 minutes après l'ingestion (+3,6%, Δ = 12 ms) avec un effet maximal 45 minutes après l'ingestion (+5%, Δ = 15 ms) (étude n°1), ainsi qu'après un exercice de sprint (+6%, Δ = 29 ms) (étude n°2). Concernant la tâche de Simon, l'ingestion d'un complexe de guarana entraîne une amélioration significative de la vitesse de traitement de l'information dès la fin de l'exercice de +3,6% (Δ = 12 ms) (étude n°5). Son ingestion semble aussi diminuer le RPE d'environ 12% comparé au Pl (étude n°5), ce qui cohérent avec la seule étude préalable ayant, à notre connaissance, investigué l'effet de l'ingestion d'un complexe de guarana sur le RPE au cours d'un exercice modéré (Veasey et al. 2015). Une diminution de l'effort perçu est digne d'intérêt puisque de nombreuses études montrent l'effet régulateur de cet indice sur les stratégies d'allure en compétition et la performance (Tucker 2009).

La vision globale des effets recueillis sur nos 4 protocoles expérimentaux s'avère particulièrement intéressante car elle permet d'émettre des inférences sur les processus possiblement impactés par l'ingestion d'un complexe de guarana multivitaminé. La méthode soustractive de Donders (1868) se propose de mesurer de la durée des processus qui différencient deux tâches. Dans l'application de cette méthode, Donders a considéré 3 tâches : une tâche de TRS, une tâche de Go/Nogo et une tâche de TRC qui ont toutes trois été utilisées au cours de nos protocoles

expérimentaux (études n°1, n°2, n°4 et n°5). Chacune de ces tâches se différencient par l'ajout d'un processus cognitif supplémentaire (voir chapitre 1, III, § 3.1, p 58). Si l'on postule que l'activité sensorimotrice est constituée d'une séquence de processus de durées indépendantes et que certains processus peuvent être rajoutés ou ôtés sans affecter la durée des autres processus, il est possible d'inférer de la durée des processus qui différencient des essais. Ainsi, le temps occupé par les processus d'*identification du stimulus* peut être estimé en soustrayant le temps nécessaire à la réalisation de la tâche de Go/Nogo à celui de la tâche de TRS. Similairement, l'estimation du temps nécessaire aux processus de *sélection de la réponse (traduction perceptivo-motrice)* peut être évaluée en soustrayant le temps nécessaire à la réalisation de la tâche de de TRC à celui de la tâche de Go/Nogo. L'ensemble de nos résultats expérimentaux suggèrent que les étapes de *détection*, de *programmation* et *d'exécution motrice*, qui constituent l'intégralité de la tâche de TRS, ne sont pas impactées par l'ingestion d'un complexe de guarana. En revanche les effets bénéfiques indiqués sur les tâches de Go/Nogo et de Simon suggèrent que les étapes centrales d'*identification du stimulus* et possiblement de *sélection de la réponse* seraient favorablement impactées. Même si à ce jour, cette méthode a été critiquée notamment en raison du mode de transmission de l'information (Hasbroucq 2001), il est possible que l'ingestion d'un complexe de guarana influence une ou plusieurs étapes centrales du traitement de l'information. Cette hypothèse semble converger avec les résultats de notre étude n°5 qui indiquent que cette supplémentation est la seule à entraîner une amélioration simultanée de la vitesse du traitement de l'information et de la précision, ce qui pourrait suggérer une amélioration des processus centraux de la chaîne de traitement.

Une limite majeure dans l'interprétation de nos résultats doit cependant être considérée. Le guarana est une supplémentation nutritionnelle qui, au cours de nos protocoles expérimentaux, n'a jamais été testée de façon isolée. En effet, ce supplément a toujours été associé à d'autres substances connues pour leurs actions psychostimulantes telles que le ginseng ou des complexes multivitaminés (études n°1, 2, 4 et 5). Il n'est donc pas possible de dissocier la part relative de ces différents composés.

La supplémentation devra donc se réaliser sous cette forme composée, à un dosage maximal de 300 mg. A ce jour, l'ingestion est à privilégier au rinçage de bouche puisque, d'une part cette méthode d'administration présente des effets favorables sur le traitement de l'information même à faible dosage, tout en étant associée à une stabilité du système nerveux autonome (études 1). D'autre part, les résultats concernant l'effet de l'utilisation d'un complexe de guarana en rinçage de bouche nécessitent de plus amples recherches.

2.3. Effets des hydrates de carbone

Nos résultats expérimentaux suggèrent que l'ingestion d'hydrates de carbone entraîne un effet ergogénique *très probable* sur le pic de puissance développé lors de répétition de sprints (+36 W), ainsi qu'un effet bénéfique *probable* sur le développement de la fatigue (-2%) (étude n°3). Cet effet médié par un mécanisme central, est en accord avec plusieurs études ayant indiqué l'effet ergogénique des CHO en rinçage de bouche sur la performance lors d'exercices similaires (Beaven et al. 2013; Lee et al. 2014) et qui pourrait être induit par une augmentation de

l'excitabilité cortico-spinale (Gant, Stinear et Byblow 2010) . Nos résultats indiquent aussi que l'utilisation des hydrates de carbone en rinçage de bouche entraîne une diminution *probable* du RPE au cours d'un exercice de pédalage sur ergocycle sous-maximal de 5% (étude 4).

L'ingestion d'hydrates de carbone améliore la vitesse de traitement de l'information dès la fin de l'exercice lors d'une tâche de TRS (+8%, Δ = 17 ms) (étude n°3) et lors d'une tâche décisionnelle (TRC) (+4%, Δ = 14 ms) (étude n°5). Cet effet pourrait être médié par une augmentation du niveau d'éveil, comme cela est suggéré par la surestimation temporelle mesurée dans l'étude n°4.

Par ailleurs, les résultats issus de notre étude n°5 suggèrent que l'ingestion d'hydrates de carbone couplée à celle de caféine (CHO + CAF) ou de guarana (CHO + GUAc) ne présente aucun bénéfice supplémentaire sur la performance cognitive, comparée à l'ingestion de ces composés isolés. Ce résultat est particulièrement intéressant pour des sportifs qui multiplient souvent les stratégies nutritionnelles, alors que les justifications scientifiques de ce choix restent peu abondantes. A notre connaissance seules deux études issues du même groupe ont investigué l'effet de l'ingestion simultanée de CHO (~ 68,8 g) et de caféine (~ 100 mg), sur la performance cognitive mesurée lors de la tâche de Stroop au cours d'une sollicitation physiologique. Les résultats suggèrent un effet bénéfique de cette association comparée à l'ingestion de CHO seuls sur la performance cognitive, mesurée au cours d'un exercice sous-maximal prolongé sur ergocycle (Hogervorst et al. 2008), et dès la fin d'une course contre la montre (Hogervorst et al. 1999). Il semblerait donc que nos résultats soient contradictoires avec le peu d'études ayant investigué cette ingestion composée.

Par ailleurs, nos résultats mettent aussi en exergue une inefficacité de l'ingestion couplée d'hydrates de carbone et de guarana sur la performance cognitive, ce qui à notre connaissance, n'a jamais été investigué.

Conclusion Générale

De ce travail de thèse ressortent plusieurs points essentiels :

● D'une part, l'ingestion de caféine ou d'hydrates de carbone améliore la vitesse de traitement de l'information lors de tâches décisionnelles dès la fin d'un exercice sous-maximal.

● De façon intéressante, l'ingestion d'un complexe de guarana multivitaminé, permet aussi une amélioration de la vitesse de traitement de l'information lors de tâche décisionnelle dès la fin d'un exercice sous-maximal, tout en limitant des effets délétères de la caféine sur le système nerveux parasympathique.

● L'ingestion de caféine ou d'un complexe de guarana entraîne une perception de l'effort moindre au cours d'un exercice sous-maximal.

● L'ingestion d'hydrates de carbone entraîne une amélioration *très probable* de la performance lors d'exercices anaérobies.

● De façon additionnelle, l'utilisation en rinçage de bouche d'un complexe de guarana multivitaminé, de caféine et d'hydrates de carbone améliore *probablement* la vitesse de traitement de l'information lors de tâches décisionnelles au cours de l'exercice.

● Pour la première fois, une amélioration du contrôle de l'interférence au cours de l'exercice est suggérée suite à l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche.

● A ce jour, l'ingestion d'hydrates de carbone couplée à de la caféine ou un complexe de guarana ne présente aucun effet additionnel sur le fonctionnement cognitif, que l'ingestion de ces composés de façon isolée.

En outre, nos résultats indiquent aussi que :

● La sollicitation physiologique induite par l'exercice améliore la vitesse de traitement de l'information lors de tâches décisionnelles au cours d'un exercice sous-maximal.

● Elle impacte aussi le traitement temporel, qui évolue dans le sens d'une surestimation temporelle, classiquement interprétée en psychologie du temps comme une augmentation du niveau d'éveil.

Ce travail de thèse aura permis d'apporter des éléments nouveaux sur l'effet de plusieurs stratégies nutritionnelles, classiquement consommées par les athlètes, sur le fonctionnement cognitif et notamment sur la performance cognitive. Nos résultats valident notre hypothèse initiale de potentialisation de l'effet de l'exercice sur la performance cognitive. Ils suggèrent que la mise en place de supplémentations nutritionnelles lors d'un exercice améliore l'efficacité de processus cognitifs qui s'avèrent être essentiels à la performance sportive. Néanmoins à ce jour plusieurs points demandent de plus amples recherches.

D'une part nous souhaiterions investiguer plus précisément l'effet de la caféine sur le contrôle cognitif. En effet, l'amélioration du contrôle de l'interférence suggérée au cours de nos protocoles expérimentaux reste équivoque, et nécessite de plus amples recherches. Par ailleurs, nous souhaiterions aussi évaluer l'effet de ces stratégies nutritionnelles sur d'autres formes de contrôle cognitif et notamment sur les effets séquentiels. En effet, il a été montré que le système nerveux a la capacité à utiliser par des mécanismes de contrôle « proactif », le résultat de l'action précédente afin de modifier la stratégie et améliorer la performance à venir. A ce titre, nous souhaiterions investiguer l'effet de stratégies nutritionnelles sur les ajustements post-conflit (Gratton, Coles, et Donchin 1992) qui semblent impliquer un relâchement du contrôle après un essai congruent et un renforcement de ce dernier après un essai incongruent. Les ajustements post-erreur sont aussi intéressants car ils témoignent de la capacité du système superviseur à détecter l'erreur commise et à ajuster le traitement de l'information pour l'essai suivant (Rabbitt 1966). Il est communément admis que le TR d'un essai correct est plus long après qu'une erreur ait été commise.

Par ailleurs, à l'égard des études ayant tenté de localiser les effets de l'exercice sur les étapes de traitement de l'information sensorimotrice, nous souhaiterions utiliser des protocoles similaires afin de localiser la ou les étape(s) spécifiquement impactée(s) par l'utilisation de chacune de nos supplémentations nutritionnelles. A ce titre, l'utilisation de la technique d'électromyographie permettra de décomposer le TR en deux composantes chronométriques distinctes, et de déterminer si la stratégie nutritionnelle affecte les processus d'intégration corticaux précoces ou les processus moteurs tardifs (Hasbroucq et al. 2001). Cette méthode permettra aussi de préciser le rôle de l'inhibition dans un contrôle « réactif », qui opère en temps réel sur un essai en cours. Le contrôle réactif permet la détection par le système superviseur d'une

défaillance dans le système en cours, et la mise en place de processus de correction de la réponse erronée avant son apparition. Ce type de contrôle est facilement mesurable comportementalement par l'analyse des ébauches des erreurs. Ces dernières correspondent à l'amorce d'une réponse, mesurée par l'activité EMG du muscle impliqué dans la réponse alternative, mais qui reste cependant trop faible pour provoquer le seuil de déclenchement de la réponse. Il est communément admis que ces ébauches sont détectées, inhibées et corrigées par un mécanisme de contrôle réactif avant d'atteindre l'intensité suffisante pour produire une erreur (Burle et al. 2002). Par ailleurs, la manipulation de facteurs computationnels selon la méthode des facteurs additifs (Sternberg 1969) pourrait aussi être un outil intéressant pour localiser la ou les étape(s) de la chaîne de traitement préférentiellement impactée(s) par l'utilisation de nos stratégies nutritionnelles.

Enfin, grâce à des effets bénéfiques sur la performance physique et sur la performance cognitive, l'utilisation de la caféine en rinçage de bouche pourrait être bénéfique dans de nombreuses disciplines sportives. Néanmoins une évaluation précise de son impact sur le fonctionnement du système nerveux autonome semble nécessaire avant de recommander son utilisation à un large public.

Références

Abernethy, Bruce. 1988. « Dual-Task Methodology and Motor Skills Research: Some Applications and Methodological Constraints ». *Journal of Human Movement Studies* 14 (3): 101-32.

Acworth, I., J. Nicholass, B. Morgan, et E. A. Newsholme. 1986. « Effect of Sustained Exercise on Concentrations of Plasma Aromatic and Branched-Chain Amino Acids and Brain Amines ». *Biochemical and Biophysical Research Communications* 137 (1): 149-53.

Addicott, M. A., et P. J. Laurienti. 2009. « A Comparison of the Effects of Caffeine Following Abstinence and Normal Caffeine Use ». *Psychopharmacology* 207 (3): 423. https://doi.org/10.1007/s00213-009-1668-3.

Ali, A., M. J. Yeon Yoo., C. Moss, et Bernhard H. Breier. 2016. « Carbohydrate Mouth Rinsing Has No Effect on Power Output during Cycling in a Glycogen-Reduced State ». *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 13 (1). https://doi.org/10.1186/s12970-016-0131-1.

Ali, A., J. O'Donnell, C. Starck, et K. Rutherfurd-Markwick. 2015. « The Effect of Caffeine Ingestion during Evening Exercise on Subsequent Sleep Quality in Females ». *International Journal of Sports Medicine* 36 (06): 433-39. https://doi.org/10.1055/s-0034-1398580.

Arcelin, R., D. Delignieres, et J. Brisswalter. 1998. « Selective Effects of Physical Exercise on Choice Reaction Processes ». *Perceptual and Motor Skills* 87 (1): 175-85. https://doi.org/10.2466/pms.1998.87.1.175.

Aron, A. R. 2007. « The Neural Basis of Inhibition in Cognitive Control ». *The Neuroscientist* 13 (3): 214-28. https://doi.org/10.1177/1073858407299288.

Asbach, S., C. Schulz, et H. Lehnert. 2001. « Effects of corticotropin-releasing hormone on locus coeruleus neurons in vivo: a microdialysis study using a novel bilateral approach ». *European journal of endocrinology* 145 (3): 359–363.

Audiffren, M., P. D. Tomporowski, et J. Zagrodnik. 2008. « Acute Aerobic Exercise and Information Processing: Energizing Motor Processes during a Choice Reaction Time Task ». *Acta Psychologica* 129 (3): 410-19. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.09.006.

Bailey, S. P., J. M. Davis, et E. N. Ahlborn. 1992. « Effect of Increased Brain Serotonergic Activity on Endurance Performance in the Rat ». *Acta Physiologica Scandinavica* 145 (1): 75-76. https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1992.tb09338.x.

Bastos-Silva, V., A. Melo, A. Lima-Silva, F. Moura, R. Bertuzzi, et G. de Araujo. 2016. « Carbohydrate Mouth Rinse Maintains Muscle Electromyographic Activity and Increases Time to Exhaustion during Moderate but Not High-Intensity Cycling Exercise ». *Nutrients* 8 (3): 49. https://doi.org/10.3390/nu8030049.

Bataineh, M. F., A. M. Al-Nawaiseh, M. H. Abu Altaieb, D. M. Bellar, O. S. Hindawi, et L. W. Judge. 2018. « Impact of Carbohydrate Mouth Rinsing on Time to Exhaustion during Ramadan: A Randomized Controlled Trial in Jordanian Men ». *European Journal of Sport Science* 18 (3): 357-66. https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1420236.

Bear, M. F., B. W. Connors, M. A. Paradiso. « Cerveau et comportement : aspects neurochimiques » In *Neurosciences à la découverte du cerveau,* edited by M. F. Bear, B.W. Connors, M. A. Paradiso, 494-519. 3ème edition, Pradel, 2007.

Beaven, C. M., P. Maulder, A. Pooley, L. Kilduff, et C. Cook. 2013. « Effects of Caffeine and Carbohydrate Mouth Rinses on Repeated Sprint Performance ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 38 (6): 633-37. https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0333.

Beaver, W. L., K. Wasserman, et B. J. Whipp. 1985. « Improved Detection of Lactate Threshold during Exercise Using a Log-Log Transformation ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 59 (6): 1936-40. https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.6.1936.

Beelen, M., J. Berghuis, B. Bonaparte, S. B. Ballak, A. E. Jeukendrup, et L. J. C. van Loon. 2009. « Carbohydrate Mouth Rinsing in the Fed State: Lack of Enhancement of Time-Trial Performance ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 19 (4): 400-409.

Behrens, M., et W. Meyerhof. 2006. « Signaling in the Chemosensory Systems: Bitter Taste Receptors and Human Bitter Taste Perception ». *Cellular and Molecular Life Sciences* 63 (13): 1501-9. https://doi.org/10.1007/s00018-006-6113-8.

Bell, D. G., et T. M. McLellan. 2002. « Exercise Endurance 1, 3, and 6 H after Caffeine Ingestion in Caffeine Users and Nonusers ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 93 (4): 1227-34. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00187.2002.

Berridge, C. W., D. M. Devilbiss, M. E. Andrzejewski, A. F. T. Arnsten, A. E. Kelley, B. Schmeichel, C. Hamilton, et R. C. Spencer. 2006. « Methylphenidate Preferentially Increases Catecholamine Neurotransmission within the Prefrontal Cortex at Low Doses That Enhance Cognitive Function ». *Biological Psychiatry* 60 (10): 1111-20. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.04.022.

Beyer, K. B., M. D. Sage, W. R. Staines, L. E. Middleton, et W. E. McIlroy. 2017. « A Single Aerobic Exercise Session Accelerates Movement Execution but Not Central Processing ». *Neuroscience* 346 (mars): 149-59. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.01.020.

Blomstrand, E., P. Hassmén, B. Ekblom, et E. A. Newsholme. 1991. « Administration of Branched-Chain Amino Acids during Sustained Exercise--Effects on Performance and on Plasma Concentration of Some Amino Acids ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 63 (2): 83-88.

Borg, G. A. 1982. « Psychophysical Bases of Perceived Exertion ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14 (5): 377-81.

Bottoms, L., H. Hurst, A. Scriven, F. Lynch, J. Bolton, L. Vercoe, Z. Shone, G. Barry, et J. Sinclair. 2014. « The Effect of Caffeine Mouth Rinse on Self-Paced Cycling Performance ». *Comparative Exercise Physiology* 10 (4): 239-45. https://doi.org/10.3920/CEP140015.

Bottoms, L., A. Greenhalgh, et K. Gregory. 2013. « The Effect of Caffeine Ingestion on Skill Maintenance and Fatigue in Epee Fencers ». *Journal of Sports Sciences* 31 (10): 1091-99. https://doi.org/10.1080/02640414.2013.764466.

Botvinick, M. M., J. D. Cohen, et C. S. Carter. 2004. « Conflict Monitoring and Anterior Cingulate Cortex: An Update ». *Trends in Cognitive Sciences* 8 (12): 539-46. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.10.003.

Botwinick, J., et L. W. Thompson. 1966. « Components of Reaction Time in Relation to Age and Sex ». *The Journal of Genetic Psychology* 108 (2d Half): 175-83. https://doi.org/10.1080/00221325.1966.10532776.

Bridge, M. W., A. S. Weller, M. Rayson, et D. A. Jones. 2003. « Ambient Temperature and the Pituitary Hormone Responses to Exercise in Humans ». *Experimental Physiology* 88 (5): 627-35.

Brisswalter, J., M. Collardeau, et R. Arcelin. 2002. « Effects of Acute Physical Exercise Characteristics on Cognitive Performance ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 32 (9): 555-66.

Brisswalter, J., R. Arcelin, M. Audiffren, et D. Delignières. 1997. « Influence of Physical Exercise on Simple Reaction Time: Effect of Physical Fitness ». *Perceptual and Motor Skills* 85 (3): 1019-27. https://doi.org/10.2466/pms.1997.85.3.1019.

Brisswalter, J., M. Durand, D. Delignieres, et P. Legros. 1995. « Optimal and non-optimal demand in a dual task of pedalling and simple reaction time: Effects on energy expenditure and cognitive performance ». *Journal of Human Movement Studies* 29 (1): 15–34.

Brockhoff, A., M. Behrens, M. Y. Niv, et W. Meyerhof. 2010. « Structural Requirements of Bitter Taste Receptor Activation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (24): 11110-15. https://doi.org/10.1073/pnas.0913862107.

Brunyé, T. T., C. R. Mahoney, H. R. Lieberman, et H. A. Taylor. 2010. « Caffeine Modulates Attention Network Function ». *Brain and Cognition* 72 (2): 181-88. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.07.013.

Burke, L., B. Desbrow, L. Spriet. «How caffeine works». In *Caffeine for Sports performance,* edited by Louise Burke, Ben Desbrow and Lawrence Spriet, *7-20*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2013.

Burke, L M., G Millet, et M. A. Tarnopolsky. 2007. « Nutrition for Distance Events ». *Journal of Sports Sciences* 25 (sup1): S29-38. https://doi.org/10.1080/02640410701607239.

Burke, L. *Practical Sports Nutrition*. Human Kinetics Publishers, 1st edn. Champaign, IL, 2007.

Burle, B., C.A. Possamaï, F. Vidal, M. Bonnet, et T. Hasbroucq. 2002. « Executive Control in the Simon Effect: An Electromyographic and Distributional Analysis ». *Psychological Research* 66 (4): 324-36. https://doi.org/10.1007/s00426-002-0105-6.

Burle, B., et L. Casini. 2001. « Dissociation between Activation and Attention Effects in Time Estimation: Implications for Internal Clock Models ». *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 27 (1): 195-205.

Campos, A. R., A. I. S. Barros, F. A. A. Albuquerque, L. K. A. M Leal, et V. S. N. Rao. 2005. « Acute Effects of Guarana (Paullinia Cupana Mart.) on Mouse Behaviour in Forced Swimming and Open Field Tests ». *Phytotherapy Research: PTR* 19 (5): 441-43. https://doi.org/10.1002/ptr.1471.

Cappelletti, S., D. Piacentino, G. Sani, et M. Aromatario. 2015. « Caffeine: Cognitive and Physical Performance Enhancer or Psychoactive Drug? » *Current Neuropharmacology* 13 (1): 71-88. https://doi.org/10.2174/1570159X13666141210215655.

Carr, A., B. Dawson, K. Schneiker, C. Goodman, et B. Lay. 2008. « Effect of Caffeine Supplementation on Repeated Sprint Running Performance ». *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 48 (4): 472-78.

Carter, C. S., et V. van Veen. 2007. « Anterior Cingulate Cortex and Conflict Detection: An Update of Theory and Data ». *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience* 7 (4): 367-79.

Carter, J. M., A. E. Jeukendrup, C. H. Mann, et D. A. Jones. 2004a. « The Effect of Glucose Infusion on Glucose Kinetics during a 1-H Time Trial »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 36 (9): 1543-50. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000139892.69410.D8.

Carter, J. M., A. E. Jeukendrup, et D. A. Jones. 2004b. « The Effect of Carbohydrate Mouth Rinse on 1-H Cycle Time Trial Performance »: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, décembre, 2107-11. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000147585.65709.6F.

Casini, L., C. Ramdani-Beauvir, B. Burle, et F. Vidal. 2013. « How Does One Night of Sleep Deprivation Affect the Internal Clock? » *Neuropsychologia* 51 (2): 275-83. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.07.041.

Chambers, E. S., M. W. Bridge, et D. A. Jones. 2009. « Carbohydrate Sensing in the Human Mouth: Effects on Exercise Performance and Brain Activity: Oral Carbohydrate and Exercise Performance ». *The Journal of Physiology* 587 (8): 1779-94. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.164285.

Chang, Y. K. « Acute exercise and event-related potential: current status and future perspective ». In *Exercise-Cognition Interaction*, edited by McMorris Terry, 105-130. Elsevier, 2016.

Chang, Y.K., J.D. Labban, J.I. Gapin, et J.L. Etnier. 2012. « The Effects of Acute Exercise on Cognitive Performance: A Meta-Analysis ». *Brain Research* 1453 (mai): 87-101. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.068.

Chaouloff, F. 1989. « Physical Exercise and Brain Monoamines: A Review ». *Acta Physiologica Scandinavica* 137 (1): 1-13. https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1989.tb08715.x.

Che Muhamed, A. M., N. G. Mohamed, N. Ismail, A. R. Aziz, et R. Singh. 2014. « Mouth Rinsing Improves Cycling Endurance Performance during Ramadan Fasting in a Hot Humid Environment ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 39 (4): 458-64. https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0276.

Chmura, J., H. Krysztofiak, A. W. Ziemba, K. Nazar, et H. Kaciuba-Uścilko. 1998. « Psychomotor Performance during Prolonged Exercise above and below the Blood Lactate Threshold ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 77 (1-2): 77-80.

Chmura, J., K. Nazar, et H. Kaciuba-Uściłko. 1994. « Choice Reaction Time during Graded Exercise in Relation to Blood Lactate and Plasma Catecholamine Thresholds ». *International Journal of Sports Medicine* 15 (4): 172-76. https://doi.org/10.1055/s-2007-1021042.

Chodzko-Zajko, W. J. 1991. « Physical Fitness, Cognitive Performance, and Aging ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23 (7): 868-72.

Chong, E., K.J. Guelfi, et P.A. Fournier. 2011. « Effect of a Carbohydrate Mouth Rinse on Maximal Sprint Performance in Competitive Male Cyclists ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 14 (2): 162-67. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2010.08.003.

Clarke, N. D., E. Kornilios, et D. L. Richardson. 2015. « Carbohydrate and Caffeine Mouth Rinses Do Not Affect Maximum Strength and Muscular Endurance Performance ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (10): 2926-31. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000945.

Close, G.L., D.L. Hamilton, A. Philp, L.M. Burke, et J.P. Morton. 2016. « New Strategies in Sport Nutrition to Increase Exercise Performance ». *Free Radical Biology and Medicine* 98 (septembre): 144-58. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.01.016.

Cohen, J. 1992. « A Power Primer ». *Psychological Bulletin* 112 (1): 155-59.

Collardeau, M., J. Brisswalter, F. Vercruyssen, M. Audiffren, et C. Goubault. 2001. « Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: influence of carbohydrate availability ». *European Journal of Applied Physiology* 86 (2): 150-56. https://doi.org/10.1007/s004210100513.

Cooper, C. J. 1973. « Anatomical and Physiological Mechanisms of Arousal, with Special Reference to the Effects of Exercise ». *Ergonomics* 16 (5): 601-9. https://doi.org/10.1080/00140137308924551.

Cramer, M. N., M. W. Thompson, et J. D. Périard. 2015. « Thermal and Cardiovascular Strain Mitigate the Potential Benefit of Carbohydrate Mouth Rinse During Self-Paced Exercise in the Heat ». *Frontiers in Physiology* 6 (novembre). https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00354.

Davis, J. M., Z. Zhao, H. S. Stock, K. A. Mehl, J. Buggy, et G. A. Hand. 2003. « Central Nervous System Effects of Caffeine and Adenosine on Fatigue ». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 284 (2): R399-404. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00386.2002.

Davis, J. M., S. P. Bailey, J. A. Woods, F. J. Galiano, M. T. Hamilton, et W. P. Bartoli. 1992. « Effects of Carbohydrate Feedings on Plasma Free Tryptophan and Branched-Chain Amino Acids during Prolonged Cycling ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 65 (6): 513-19.

Davey, C. P. 1973. « Physical Exertion and Mental Performance ». *Ergonomics* 16 (5): 595-99. https://doi.org/10.1080/00140137308924550.

Davranche, K., J. Brisswalter, et R. Radel. 2015. « Where Are the Limits of the Effects of Exercise Intensity on Cognitive Control? » *Journal of Sport and Health Science* 4 (1): 56-63. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.08.004.

Davranche, K., J. Temesi, S. Verges, et T. Hasbroucq. 2015. « Transcranial Magnetic Stimulation Probes the Excitability of the Primary Motor Cortex: A Framework to Account for the Facilitating Effects of Acute Whole-Body Exercise on Motor Processes ». *Journal of Sport and Health Science* 4 (1): 24-29. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.09.001.

Davranche, K., et Audiffren, M. « A chronometric and electromyographic approach to the effect of exercise on reaction time ». In *Exercise and cognitive function*, edited by Terry McMorris, Phillip Tomporowsky and Michel Audiffren, 152-159., John Wiley & Sons, 2009.

Davranche, K., B. Hall, et T. McMorris. 2009. « Effect of Acute Exercise on Cognitive Control Required during an Eriksen Flanker Task ». *Journal of Sport & Exercise Psychology* 31 (5): 628-39.

Davranche, K., B. Burle, M. Audiffren., et T. Hasbroucq. 2006. « Physical Exercise Facilitates Motor Processes in Simple Reaction Time Performance: An Electromyographic Analysis ». *Neuroscience Letters* 396 (1): 54-56. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.11.008.

Davranche, K., B. Burle, M. Audiffren, et T. Hasbroucq. 2005. « Information Processing during Physical Exercise: A Chronometric and Electromyographic Study ». *Experimental Brain Research* 165 (4): 532-40. https://doi.org/10.1007/s00221-005-2331-9.

Davranche, K., et A. Pichon. 2005. « Critical Flicker Frequency Threshold Increment after an Exhausting Exercise ». *Journal of Sport and Exercise Psychology* 27 (4): 515-20. https://doi.org/10.1123/jsep.27.4.515.

Davranche, K., et M. Audiffren. 2004. « Facilitating Effects of Exercise on Information Processing ». *Journal of Sports Sciences* 22 (5): 419-28. https://doi.org/10.1080/02640410410001675289.

De Pauw, K, B. Roelands, J. Van Cutsem, U. Marusic, T. Torbeyns, et R. Meeusen. 2017a. « Electro-Physiological Changes in the Brain Induced by Caffeine or Glucose Nasal Spray ». *Psychopharmacology* 234 (1): 53-62. https://doi.org/10.1007/s00213-016-4435-2.

De Pauw, K., B. Roelands, J. Van Cutsem, L. Decroix, A. Valente, K. Taehee, R; B. LettanII, A. E. Carrillo, et R. Meeusen. 2017b. « Do Glucose and Caffeine Nasal Sprays Influence Exercise And/Or Cognitive Performance? » *International Journal of Sports Physiology and Performance*, février, 1-22. https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0598.

De Pauw, K., B. Roelands, K. Knaepen, M. Polfliet, J. Stiens, et R. Meeusen. 2015. « Effects of Caffeine and Maltodextrin Mouth Rinsing on P300, Brain Imaging, and Cognitive Performance ». *Journal of Applied Physiology* 118 (6): 776-82. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01050.2014.

Delignières, D., J. Brisswalter, et P. Legros. 1994. « Influence of physical exercise on choice reaction time in sports experts: the mediating role of resource allocation ». *Journal of Human Movement Studies* 27 (4): 173–188.

Deuster, P. A., G. P. Chrousos, A. Luger, J. E. DeBolt, L. L. Bernier, U. H. Trostmann, S. B. Kyle, L. C. Montgomery, et D. L. Loriaux. 1989. « Hormonal and Metabolic Responses of Untrained, Moderately Trained, and Highly Trained Men to Three Exercise Intensities ». *Metabolism: Clinical and Experimental* 38 (2): 141-48.

Devenney, S., K. Collins, et M. Shortall. 2016. « Effects of Various Concentrations of Carbohydrate Mouth Rinse on Cycling Performance in a Fed State ». *European Journal of Sport Science* 16 (8): 1073-78. https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1196735.

Doering, T. M., J. W. Fell, M. D. Leveritt, B. Desbrow, et C. M. Shing. 2014. « The Effect of a Caffeinated Mouth-Rinse on Endurance Cycling Time-Trial Performance ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 24 (1): 90-97. https://doi.org/10.1123/ijsnem.2013-0103.

Doherty, M., et P. M. Smith. 2005. « Effects of Caffeine Ingestion on Rating of Perceived Exertion during and after Exercise: A Meta-Analysis ». *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 15 (2): 69-78. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2005.00445.x.

Doherty, M., et P. M. Smith. 2004. « Effects of caffeine infestion on exercise testing: A meta-analysis ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise metabolism* 14: 626-646.

Dolan, P., K. E. Witherbee, K. M. Peterson, et C. M. Kerksick. 2017. « Effect of Carbohydrate, Caffeine, and Carbohydrate + Caffeine Mouth Rinsing on Intermittent Running Performance in Collegiate Male Lacrosse Athletes ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 31 (9): 2473-79. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001819.

Donders, F C. 1868. « La vitesse des actes psychiques ». *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* 296–317.

Dorling, J. L., et C. P. Earnest. 2013. « Effect of carbohydrate mouth rinsing on multiple sprint performance ». *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 10: 41. https://doi.org/10.1186/1550-2783-10-41.

Droit-Volet, S., J. Wearden. 2003. « Les modèles d'horloge interne en psychologie du temps». *L'année psychologique* 104: 617-654.

Drollette, E. S., M. R. Scudder, L. B. Raine, R. D. Moore, B. J. Saliba, M. B. Pontifex, et C. H. Hillman. 2014. « Acute Exercise Facilitates Brain Function and Cognition in

Children Who Need It Most: An ERP Study of Individual Differences in Inhibitory Control Capacity ». *Developmental Cognitive Neuroscience* 7 (janvier): 53-64. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2013.11.001.

Espinola, E. B., R. F. Dias, R. Mattei, et E. A. Carlini. 1997. « Pharmacological activity of Guarana (Paullinia cupana Mart.) in laboratory animals ». *Journal of ethnopharmacology* 55 (3): 223–229.

Essig, D., Costill, D.L., Van Handel, P.J 1980. « Effects of caffeine ingestion on utilization of muscle glycogen and lipid during leg ergometer cycling ». *International Journal of Sports Medicine* 01(2), 86-90. Doi: 10.1055/s-2008-1034637.

Eston, Roger. 2012. « Use of ratings of perceived exertion in sports ». *International journal of sports physiology and performance* 7 (2): 175–182.

Etnier, J.L., Salazar, W., Landers, D.M., Petruzello, S.J., Han, M., Nowell, P. 1997. «The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: a meta-analysis.» *Journal of Sport and Exercise Psychology* 19:149-277.

Fares, E.J., et B. Kayser. 2011. « Carbohydrate Mouth Rinse Effects on Exercise Capacity in Pre- and Postprandial States ». *Journal of Nutrition and Metabolism* 2011: 1-6. https://doi.org/10.1155/2011/385962.

Fraga, C., B. Velasques, A. J. Koch, M. Machado, D. Paulucio, P. Ribeiro, et F. A. Pompeu. 2017. « Carbohydrate Mouth Rinse Enhances Time to Exhaustion during Treadmill Exercise ». *Clinical Physiology and Functional Imaging* 37 (1): 17-22. https://doi.org/10.1111/cpf.12261.

Fredholm, B. B., K. Bättig, J. Holmén, A. Nehlig, et E. E. Zvartau. 1999. « Actions of Caffeine in the Brain with Special Reference to Factors That Contribute to Its Widespread Use ». *Pharmacological Reviews* 51 (1): 83-133.

Fredholm, B. B. 1995. « Adenosine, adenosine receptors and the actions of caffeine ». *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology* 76 (2): 93–101.

Gam, S., K. J. Guelfi, G. Hammond, et P. A. Fournier. 2015. « Mouth Rinsing and Ingestion of a Bitter-Tasting Solution Increases Corticomotor Excitability in Male Competitive Cyclists ». *European Journal of Applied Physiology* 115 (10): 2199-2204. https://doi.org/10.1007/s00421-015-3200-2.

Gam, S. « The bitter taste of victory: effects of a bitter tasting quinine solution on maximal intensity exercise performance ». Ph.D., University of Western Australia, 2014.

Gant, N, C. M. Stinear, et W. D. Byblow. 2010. « Carbohydrate in the Mouth Immediately Facilitates Motor Output ». *Brain Research* 1350 (septembre): 151-58. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.04.004.

Gibbon, J., R. M. Church, et W. H. Meck. 1984. « Scalar timing in memory ». *Annals of the New York Academy of sciences* 423 (1): 52–77.

Glaister, M., et C. Gissane. 2017. « Caffeine and Physiological Responses to Submaximal Exercise: A Meta-Analysis ». *International Journal of Sports Physiology and Performance*, septembre, 1-23. https://doi.org/10.1123/ijspp.2017-0312.

Godefroy, D., C. Rousseu, F. Vercruyssen, J. Crémieux, et J. Brisswalter. 2002. « Influence of Physical Exercise on Perceptual Response in Aerobically Trained Subjects ». *Perceptual and Motor Skills* 94 (1): 68-70. https://doi.org/10.2466/pms.2002.94.1.68.

Gratton, G., M. G. Coles, et E. Donchin. 1992. « Optimizing the Use of Information: Strategic Control of Activation of Responses ». *Journal of Experimental Psychology. General* 121 (4): 480-506.

Grego, F., J.-M. Vallier, M. Collardeau, C. Rousseu, J. Cremieux, et J. Brisswalter. 2005. « Influence of Exercise Duration and Hydration Status on Cognitive Function During Prolonged Cycling Exercise ». *International Journal of Sports Medicine* 26 (01/02): 27-33. https://doi.org/10.1055/s-2004-817915.

Guezennec, C.Y. « Quels sont les effets centraux de la fatigue musculaire ? » In *Récupération & aptitude physique*, edited par Baillière Jean-Baptiste Baillière, 37-39. Paris, 2001.

Guezennec, C. Y., A. Abdelmalki, B. Serrurier, D. Merino, X. Bigard, M. Berthelot, C. Pierard, et M. Peres. 1998. « Effects of Prolonged Exercise on Brain Ammonia and Amino Acids ». *International Journal of Sports Medicine* 19 (5): 323-27. https://doi.org/10.1055/s-2007-971925.

Hasbroucq, T., C. Tandonnet, J. Micallef-Roll, O. Blin, et C.A. Possamaï. 2003. « An Electromyographic Analysis of the Effect of Levodopa on the Response Time of Healthy Subjects ». *Psychopharmacology* 165 (3): 313-16. https://doi.org/10.1007/s00213-002-1304-y.

Hasbroucq, T., B. Burle, M. Akamatsu, F. Vidal, et C. A. Possamaï. 2001. « An Electromyographic Investigation of the Effect of Stimulus-Response Mapping on Choice Reaction Time ». *Psychophysiology* 38 (1): 157-62.

Hasbroucq, T. « Contribution à l'étude de la physiologie du traitement de l'information sensorimotrice: approches expérimentales chez l'homme, le singe et le rat. » HDR, Université de la Méditérranée, 2001.

Hasbroucq, T., I. Mouret, J. Seal, et M. Akamatsu. 1995. « Finger Pairings in Two-Choice Reaction Time Taskscolon: Does the Between-Hands Advantage Reflect Response Preparation? » *Journal of Motor Behavior* 27 (3): 251-62. https://doi.org/10.1080/00222895.1995.9941715.

Haskell, C. F., D. O. Kennedy, K. A. Wesnes, A. L. Milne, et A. B. Scholey. 2007. « A Double-Blind, Placebo-Controlled, Multi-Dose Evaluation of the Acute Behavioural Effects of Guaraná in Humans ». *Journal of Psychopharmacology* 21 (1): 65-70. https://doi.org/10.1177/0269881106063815.

Hawkins, K. H., S. Krishnan, L. Ringos, V. Garcia, et J. A. Cooper. 2017. « Running Performance with Nutritive and Non-Nutritive Sweetened Mouth Rinses ». *International Journal of Sports Physiology and Performance*, janvier, 1-23. https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0577.

Hillman, C. H., M. B. Pontifex, L. B. Raine, D. M. Castelli, E. E. Hall, et A. F. Kramer. 2009. « The Effect of Acute Treadmill Walking on Cognitive Control and Academic Achievement in Preadolescent Children ». *Neuroscience* 159 (3): 1044-54. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.01.057.

Hillman, C. H., E. M. Snook, et G.J. Jerome. 2003. « Acute Cardiovascular Exercise and Executive Control Function ». *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology* 48 (3): 307-14.

Hogervorst, E., S. Bandelow, J. Schmitt, R. Jentjens, M. Oliveira, J.Allgrove, T. Carter, et M. Gleeson. 2008. « Caffeine Improves Physical and Cognitive Performance during Exhaustive Exercise »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 40 (10): 1841-51. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817bb8b7.

Hogervorst, E., W. J. Riedel, E. Kovacs, F. Brouns, et J. Jolles. 1999. « Caffeine improves cognitive performance after strenuous physical exercise ». *International journal of sports medicine* 20 (06): 354–361.

Hopkins, W. G., S. W. Marshall, A. M. Batterham, et J. Hanin. 2009. « Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 41 (1): 3-13. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278.

Huskisson, E., S. Maggini, et M. Ruf. 2007. « The Influence of Micronutrients on Cognitive Function and Performance ». *Journal of International Medical Research* 35 (1): 1-19. https://doi.org/10.1177/147323000703500101.

Ispoglou, T., D. O'Kelly, A. Angelopoulou, M. Bargh, J. P. O'Hara, et L. C. Duckworth. 2015. « Mouth Rinsing With Carbohydrate Solutions at the Postprandial State Fail to Improve Performance During Simulated Cycling Time Trials ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (8): 2316-25. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000882.

James, R. M., S. Ritchie, I. Rollo, et L. J. James. 2017. « No Dose Response Effect of Carbohydrate Mouth Rinse on Cycling Time-Trial Performance ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 27 (1): 25-31. https://doi.org/10.1123/ijsnem.2016-0111.

Jeukendrup, A E. 2011. « Nutrition for Endurance Sports: Marathon, Triathlon, and Road Cycling ». *Journal of Sports Sciences* 29 (sup1): S91-99. https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610348.

Jeukendrup, A. E. 2008. « Carbohydrate Feeding during Exercise ». *European Journal of Sport Science* 8 (2): 77-86. https://doi.org/10.1080/17461390801918971.

Jeukendrup, A., F. Brouns, A. J. Wagenmakers, et W. H. Saris. 1997. « Carbohydrate-Electrolyte Feedings Improve 1 H Time Trial Cycling Performance ». *International Journal of Sports Medicine* 18 (2): 125-29. https://doi.org/10.1055/s-2007-972607.

Jones, L., et J. H. Wearden. 2004. « Double Standards: Memory Loading in Temporal Reference Memory ». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B, Comparative and Physiological Psychology* 57 (1): 55-77. https://doi.org/10.1080/02724990344000088.

Joyce, J., J. Graydon, T. McMorris, et K. Davranche. 2009. « The Time Course Effect of Moderate Intensity Exercise on Response Execution and Response Inhibition ». *Brain and Cognition* 71 (1): 14-19. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.03.004.

Kahneman, D. 1973. *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kalmar, J. M. 2005. « The Influence of Caffeine on Voluntary Muscle Activation ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37 (12): 2113-19.

Kamijo, K., Y. Hayashi, T. Sakai, T. Yahiro, K. Tanaka, et Y. Nishihira. 2009. « Acute Effects of Aerobic Exercise on Cognitive Function in Older Adults ». *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 64 (3): 356-63. https://doi.org/10.1093/geronb/gbp030.

Kamijo, K., Y. Nishihira, T. Higashiura, et K. Kuroiwa. 2007. « The Interactive Effect of Exercise Intensity and Task Difficulty on Human Cognitive Processing ». *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology* 65 (2): 114-21. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.04.001.

Kamijo, K., Y. Nishihira, A. Hatta, T. Kaneda, T. Kida, T. Higashiura, et K. Kuroiwa. 2004. « Changes in Arousal Level by Differential Exercise Intensity ». *Clinical Neurophysiology* 115 (12): 2693-98. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.06.016.

Kamimori, G. H., C. S. Karyekar, R. Otterstetter, D. S. Cox, T. J. Balkin, G. L. Belenky, et N. D. Eddington. 2002. « The rate of absorption and relative bioavailability of caffeine administered in chewing gum versus capsules to normal healthy volunteers ». *International journal of pharmaceutics* 234 (1-2): 159–167.

Kennedy, D.O., C.F. Haskell, K.A. Wesnes, et A.B. Scholey. 2004. « Improved Cognitive Performance in Human Volunteers Following Administration of Guarana (Paullinia Cupana) Extract: Comparison and Interaction with Panax Ginseng ». *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 79 (3): 401-11. https://doi.org/10.1016/j.pbb.2004.07.014.

Kizzi, J., A. Sum, F. E. Houston, et L. D. Hayes. 2016. « Influence of a Caffeine Mouth Rinse on Sprint Cycling Following Glycogen Depletion ». *European Journal of Sport Science* 16 (8): 1087-94. https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1165739.

Koppelstaetter, F., T. D. Poeppel, C. M. Siedentopf, A. Ischebeck, M. Verius, I. Haala, F. M. Mottaghy, et al. 2008. « Does Caffeine Modulate Verbal Working Memory Processes? An fMRI Study ». *NeuroImage* 39 (1): 492-99. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.037.

Kornblum, S., T. Hasbroucq, et A. Osman. 1990. « Dimensional Overlap: Cognitive Basis for Stimulus-Response Compatibility--a Model and Taxonomy ». *Psychological Review* 97 (2): 253-70.

Kostrzewa, R. M. 2007. « The Blood-Brain Barrier for Catecholamines - Revisited ». *Neurotoxicity Research* 11 (3-4): 261-71.

Kulaksız, T. N., Ş. N. Koşar, S. Bulut, Y. Güzel, M. E. T. Willems, T. Hazir, et H. H. Turnagöl. 2016. « Mouth Rinsing with Maltodextrin Solutions Fails to Improve Time Trial Endurance Cycling Performance in Recreational Athletes ». *Nutrients* 8 (5). https://doi.org/10.3390/nu8050269.

Lambourne, K. 2012. « The Effects of Acute Exercise on Temporal Generalization ». *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)* 65 (3): 526-40. https://doi.org/10.1080/17470218.2011.605959.

Lambourne, K., M. Audiffren, et P. D. Tomporowski. 2010. « Effects of Acute Exercise on Sensory and Executive Processing Tasks »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 42 (7): 1396-1402. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181cbee11.

Lambourne, K., et P. Tomporowski. 2010. « The Effect of Exercise-Induced Arousal on Cognitive Task Performance: A Meta-Regression Analysis ». *Brain Research* 1341 (juin): 12-24. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.091.

Lane, S. C., S. R. Bird, L. M. Burke, et J. A. Hawley. 2013. « Effect of a Carbohydrate Mouth Rinse on Simulated Cycling Time-Trial Performance Commenced in a Fed or Fasted State ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 38 (2): 134-39. https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0300.

Lee, C.L., C. F. Cheng, T. A. Astorino, C. J. Lee, H.W.Huang, et W. D. Chang. 2014. « Effects of Carbohydrate Combined with Caffeine on Repeated Sprint Cycling and Agility Performance in Female Athletes ». *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 11: 17. https://doi.org/10.1186/1550-2783-11-17.

Lee, S.H., et Y. Dan. 2012. « Neuromodulation of Brain States ». *Neuron* 76 (1): 209-22. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.09.012.

Li, Z., K. Jiao, M. Chen, et C. Wang. 2004. « Reducing the Effects of Driving Fatigue with Magnitopuncture Stimulation ». *Accident; Analysis and Prevention* 36 (4): 501-5. https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00044-7.

Lieberman, H., W. Tharion, B. Shukitt-Hale, K. Speckman, et R. Tulley. 2002. « Effects of caffeine, sleep loss, and stress on cognitive performance and mood during U.S. Navy SEAL training ». *Psychopharmacology* 164 (3): 250-61. https://doi.org/10.1007/s00213-002-1217-9.

Lindinger, M. I., T. E. Graham, et L. L. Spriet. 1993. « Caffeine Attenuates the Exercise-Induced Increase in Plasma [K+] in Humans ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 74 (3): 1149-55. https://doi.org/10.1152/jappl.1993.74.3.1149.

Luce, R. D. 1986. *Response Times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization*. OUP USA.

MacDonald, A. W., J. D. Cohen, V. A. Stenger, et C. S. Carter. 2000. « Dissociating the Role of the Dorsolateral Prefrontal and Anterior Cingulate Cortex in Cognitive Control ». *Science (New York, N.Y.)* 288 (5472): 1835-38.

Magnié, M. N., S. Bermon, F. Martin, M. Madany-Lounis, G. Suisse, W. Muhammad, et C. Dolisi. 2000. « P300, N400, Aerobic Fitness, and Maximal Aerobic Exercise ». *Psychophysiology* 37 (3): 369-77.

Mattei, R., R. F. Dias, E. B. Espínola, E. A. Carlini, et S. B. Barros. 1998. « Guarana (Paullinia Cupana): Toxic Behavioral Effects in Laboratory Animals and Antioxidants Activity in Vitro ». *Journal of Ethnopharmacology* 60 (2): 111-16.

McLellan, T. M., J. A. Caldwell, et H. R. Lieberman. 2016. « A Review of Caffeine's Effects on Cognitive, Physical and Occupational Performance ». *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 71 (décembre): 294-312. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.09.001.

McLellan, T.M., D. G. Bell, H.R. Lieberman, G. H. Kaminori. 2003-2004. « The impact of caffeine on cognitive and physical performance and marksmanship during sustained operations ». *Canadian Military Jounal* 4:47-54.

McMorris, T., Turner, A., Hale, B.J., Sproule, J. « Beyond the catecholamines hypothesis for an acute exercise-cognition interaction: an neurochemical perspective ». *In Exercise-Cognition Interaction*, edited by McMorris Terry, 65-103. Elsevier, 2016.

McMorris, T. 2016. « Developing the Catecholamines Hypothesis for the Acute Exercise-Cognition Interaction in Humans: Lessons from Animal Studies ». *Physiology & Behavior* 165 (octobre): 291-99. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.08.011.

McMorris, T., B. J. Hale, J. Corbett, K. Robertson, et C. I. Hodgson. 2015. « Does Acute Exercise Affect the Performance of Whole-Body, Psychomotor Skills in an Inverted-U Fashion? A Meta-Analytic Investigation ». *Physiology & Behavior* 141 (mars): 180-89. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.01.010.

McMorris, T., et B. J. Hale. 2012. « Differential Effects of Differing Intensities of Acute Exercise on Speed and Accuracy of Cognition: A Meta-Analytical Investigation ». *Brain and Cognition* 80 (3): 338-51. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.09.001.

McMorris, T., K. Davranche, G. Jones, B. Hall, J. Corbett, et C. Minter. 2009. « Acute Incremental Exercise, Performance of a Central Executive Task, and Sympathoadrenal System and Hypothalamic-Pituitary-Adrenal Axis Activity ». *International Journal of Psychophysiology* 73 (3): 334-40. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.05.004.

McMorris, T., K. Collard, J. Corbett, M. Dicks, et J.P. Swain. 2008. « A Test of the Catecholamines Hypothesis for an Acute Exercise–cognition Interaction ». *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 89 (1): 106-15. https://doi.org/10.1016/j.pbb.2007.11.007.

McMorris, T., M. Tallon, C. Williams, J. Sproule, S. Draper, J. Swain, J. Potter, et N. Clayton. 2003. « Incremental exercise, plasma concentrations of catecholamines, reaction time, and motor time during performance of a noncompatible choice response time task ». *Perceptual and Motor Skills* 97 (2): 590–604.

McMorris, T., et J. Graydon. 2000. « The Effect of Incremental Exercise on Cognitive Performance. » *International Journal of Sport Psychology* 31 (1): 66-81.

McMorris, T., S. Myers, W. W. MacGillivary, J. R. Sexsmith, J. Fallowfield, J. Graydon, et D. Forster. 1999. « Exercise, Plasma Catecholamine Concentrations and Decision-Making Performance of Soccer Players on a Soccer-Specific Test ». *Journal of Sports Sciences* 17 (8): 667-76. https://doi.org/10.1080/026404199365687.

Meeusen, R.. 2014. « Exercise, Nutrition and the Brain ». *Sports Medicine* 44 (S1): 47-56. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0150-5.

Meeusen, R., B. Roelands, et L. L. Spriet. 2013. « Caffeine, exercise and the brain ». In *Limits of Human Endurance*, 76:1–12. Karger Publishers. http://www.karger.com/Article/Abstract/350223.

Meeusen, R., P. Watson, H. Hasegawa, B. Roelands, et M. F. Piacentini. 2006a. « Central Fatigue: The Serotonin Hypothesis and beyond ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 36 (10): 881-909.

Meeusen, R., P. Watson, et J. Dvorak. 2006b. « The Brain and Fatigue: New Opportunities for Nutritional Interventions? » *Journal of Sports Sciences* 24 (7): 773-82. https://doi.org/10.1080/02640410500483022.

Meeusen, R., et K. De Meirleir. 1995. « Exercise and brain neurotransmission ». *Sports Medicine* 20 (3): 160–188.

Nakamura, Y., K. Nishimoto, M. Akamatu, M. Takahashi, et A. Maruyama. 1999. « The Effect of Jogging on P300 Event Related Potentials ». *Electromyography and Clinical Neurophysiology* 39 (2): 71-74.

Newsholme, E. A., et J. C. Stanley. 1987. « Substrate Cycles: Their Role in Control of Metabolism with Specific References to the Liver ». *Diabetes/Metabolism Reviews* 3 (1): 295-305.

Newsholme E. A., I. Acworth, E. Blomstrand . "Amino acids, brain neurotransmitters and a functional link between muscle and brain that is important in sustained exercise". In *Advances in myochemistry, edited by* John Libbey Eurotext, 127-133. London, 1987.

Nieoullon, A. 2002. « Dopamine and the regulation of cognition and attention ». *Progress in neurobiology* 67 (1): 53–83.

Oliveira, J. J., A. H. Crisp, C. Gabriela, R. Barbosa, A. S. e Silva, et R. Júlio. 2017. « Influence of Carbohydrate Mouth rinse on Sprint Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Journal of Exercise Physiology Online* 20 (3).

Pataky, M. W., C. J. Womack, M. J. Saunders, J. L. Goffe, A. C. D'Lugos, A. El-Sohemy, et N. D. Luden. 2016. « Caffeine and 3-Km Cycling Performance: Effects of Mouth Rinsing, Genotype, and Time of Day: Caffeine, Genetics, and Time of Day ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26 (6): 613-19. https://doi.org/10.1111/sms.12501.

Pedersen, D. J., S. J. Lessard, V. G. Coffey, E. G. Churchley, A. M. Wootton, T. Ng, M. J. Watt, et J. A. Hawley. 2008. « High Rates of Muscle Glycogen Resynthesis after Exhaustive Exercise When Carbohydrate Is Coingested with Caffeine ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 105 (1): 7-13. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01121.2007.

Penton-Voak, I. S., H. Edwards, A. Percival, et J. H. Wearden. 1996. « Speeding up an Internal Clock in Humans? Effects of Click Trains on Subjective Duration ». *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes* 22 (3): 307-20.

Pesce, C. 2009. « An integrated approach to the effect of acute and chronic exercise on cognition: the linked role of individual and tasks constraints ». In *Exercise and cognitive function*, edited by McMorris Terry, Tomporowsky Phillip & Audiffren Michel, 213- 226. John Wiley & Sons.

Phillips, S. M., S. Findlay, M. Kavaliauskas, et M. C. Grant. 2014. « The influence of serial carbohydrate mouth rinsing on power output during a cycle sprint ». *Journal of sports science & medicine* 13 (2): 252.

Pimentel, G.G., J. F. Mota, C. A. Viera. P. Gentil, M. Queiroz, N. Figueiredo, F. Felicia et al. 2017. « Caffeine Mouth Rinse Does Not Affect Sweating Rate And Performance In Runners ». *Medecine and Science in Sports & Exercise* 49:293. https://doi.org/10.1249/01.mss.0000517662.83195.d3.

Pliszka, S. R., J. T. McCracken, et J. W. Maas. 1996. « Catecholamines in Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: Current Perspectives ». *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 35 (3): 264-72. https://doi.org/10.1097/00004583-199603000-00006.

Polich, J. 2007. « Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b ». *Clinical Neurophysiology* 118 (10): 2128-48. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019.

Polich, J., et A. Kok. 1995. « Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review ». *Biological Psychology* 41 (2): 103-46. https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05130-9.

Pontifex, M. B., B. J. Saliba, L. B. Raine, D. L. Picchietti, et C. H. Hillman. 2013. « Exercise Improves Behavioral, Neurocognitive, and Scholastic Performance in Children with ADHD ». *The Journal of pediatrics* 162 (3): 543-51. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.08.036.

Pottier, A., J. Bouckaert, W. Gilis, T. Roels, et W. Derave. 2010. « Mouth Rinse but Not Ingestion of a Carbohydrate Solution Improves 1-H Cycle Time Trial Performance ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 20 (1): 105-11. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00868.x.

Powell, R. R. 1982. « Technique for Differentiating Cortical Hemispheric Activity Following Exercise ». *Perceptual and Motor Skills* 54 (3): 923-32. https://doi.org/10.2466/pms.1982.54.3.923.

Presland, J. D., M. N. Dowson, et S. P. Cairns. 2005. « Changes of Motor Drive, Cortical Arousal and Perceived Exertion Following Prolonged Cycling to Exhaustion ». *European Journal of Applied Physiology* 95 (1): 42-51. https://doi.org/10.1007/s00421-005-1395-3.

Pruessner, J. C. 2004. « Dopamine Release in Response to a Psychological Stress in Humans and Its Relationship to Early Life Maternal Care: A Positron Emission Tomography Study Using [11C]Raclopride ». *Journal of Neuroscience* 24 (11): 2825-31. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3422-03.2004.

Rabbitt, P. M. 1966. « Errors and Error Correction in Choice-Response Tasks ». *Journal of Experimental Psychology* 71 (2): 264-72.

Rendeiro, C., J. S. Rhodes, et J. P. E. Spencer. 2015. « The Mechanisms of Action of Flavonoids in the Brain: Direct versus Indirect Effects ». *Neurochemistry International* 89 (octobre): 126-39. https://doi.org/10.1016/j.neuint.2015.08.002.

Ridderinkhof, K. R., W. P.M. van den Wildenberg, S. J. Segalowitz, et C. S. Carter. 2004. « Neurocognitive Mechanisms of Cognitive Control: The Role of Prefrontal Cortex in Action Selection, Response Inhibition, Performance Monitoring, and Reward-Based Learning ». *Brain and Cognition* 56 (2): 129-40. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.016.

Ridderinkhof, K. R. 2002. « Activation and suppression in conflict tasks: Empirical clarification through distributional analyses ». *Biological Psychology - BIOL PSYCHOL*, janvier, 494-519.

Rihet, P., C..A. Possamaï, J. Micallef-Roll, O. Blin, et T. Hasbroucq. 2002. « Dopamine and Human Information Processing: A Reaction-Time Analysis of the Effect of Levodopa in Healthy Subjects ». *Psychopharmacology* 163 (1): 62-67. https://doi.org/10.1007/s00213-002-1127-x.

Robbins, T. W. 1997. « Arousal systems and attentional processes ». *Biological Psychology*, Mental Resources: Intensive and Selective Aspects, 45 (1): 57-71. https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05222-2.

Rollo, I., C. Williams, et M. Nevill. 2011. « Influence of Ingesting versus Mouth Rinsing a Carbohydrate Solution during a 1-H Run »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 43 (3): 468-75. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181f1cda3.

Rollo, I., M. Cole, R. Miller, et C. Williams. 2010. « Influence of Mouth Rinsing a Carbohydrate Solution on 1-H Running Performance »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 42 (4): 798-804. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181bac6e4.

Rollo, I., C. Williams, N. Gant, et M. Nute. 2008. « The Influence of Carbohydrate Mouth Rinse on Self-Selected Speeds during a 30-Min Treadmill Run ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 18 (6): 585-600.

Rolls, E. T., H. D. Critchley, J. V. Verhagen, et M. Kadohisa. 2010. « The Representation of Information About Taste and Odor in the Orbitofrontal Cortex ». *Chemosensory Perception* 3 (1): 16-33. https://doi.org/10.1007/s12078-009-9054-4.

Rolls, E. T. 2007. « Sensory Processing in the Brain Related to the Control of Food Intake ». *The Proceedings of the Nutrition Society* 66 (1): 96-112. https://doi.org/10.1017/S0029665107005332.

Rolls, E. T. 2000. « The Orbitofrontal Cortex and Reward ». *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)* 10 (3): 284-94.

Rolls, E. T., Z. J. Sienkiewicz, et S. Yaxley. 1989. « Hunger modulates the responses to gustatory stimuli of single neurons in the caudolateral orbitofrontal cortex of the macaque monkey ». *European Journal of Neuroscience* 1 (1): 53–60.

Rousmans, S., O. Robin, A. Dittmar, et E. Vernet-Maury. 2000. « Autonomic Nervous System Responses Associated with Primary Tastes ». *Chemical Senses* 25 (6): 709-18.

Rowlatt, G., L. Bottoms, C. J. Edmonds, et R. Buscombe. 2017. « The Effect of Carbohydrate Mouth Rinsing on Fencing Performance and Cognitive Function Following Fatigue-Inducing Fencing ». *European Journal of Sport Science* 17 (4): 433-40. https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1251497.

Ruxton, C. H. S. 2008. « The impact of caffeine on mood, cognitive function, performance and hydration: a review of benefits and risks ». *Nutrition Bulletin* 33 (1): 15–25.

Sanders, A.F. *Elements of human performance: reaction processes and attention in human skill*. Mahwah: Erlbaum, 1998.

Sanders, A. F. 1990. « Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information ». *Acta Psychologica* 74 (2): 123-67. https://doi.org/10.1016/0001-6918(90)90004-Y.

Sanders, A. F. 1983. « Towards a model of stress and human performance ». *Acta Psychologica* 53 (1): 61-97. https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90016-1.

Santos, V. G. F., V. R. F. Santos, L. J. C. Felippe, J. W. Almeida, R. Bertuzzi, M. A. P. D. M. Kiss, et A. E. Lima-Silva. 2014. « Caffeine Reduces Reaction Time and Improves Performance in Simulated-Contest of Taekwondo ». *Nutrients* 6 (2): 637-49. https://doi.org/10.3390/nu6020637.

Sara, S. J., et S. Bouret. 2012. « Orienting and Reorienting: The Locus Coeruleus Mediates Cognition through Arousal ». *Neuron* 76 (1): 130-41. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.09.011.

Schimpl, F. C., J. F. da Silva, J. F. de Carvalho Gonçalves, et P. Mazzafera. 2013. « Guarana: Revisiting a Highly Caffeinated Plant from the Amazon ». *Journal of Ethnopharmacology* 150 (1): 14-31. https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.08.023.

Schmit, C., K. Davranche, C. S. Easthope, S. S. Colson, J.Brisswalter, et R. Radel. 2015. « Pushing to the Limits: The Dynamics of Cognitive Control during Exhausting Exercise ». *Neuropsychologia* 68 (février): 71-81. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.01.006.

Scudder, M. R., E. S. Drollette, M. B. Pontifex, et C. H. Hillman. 2012. « Neuroelectric Indices of Goal Maintenance Following a Single Bout of Physical Activity ». *Biological Psychology* 89 (2): 528-31. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.12.009.

Seki, K., et M. Hugon. 1976. « Critical Flicker Frequency (CFF) and Subjective Fatigue during an Oxyhelium Saturation Dive at 62 ATA ». *Undersea Biomedical Research* 3 (3): 235-47.

Simon, S. A., I. E. de Araujo, R. Gutierrez, et M. A. L. Nicolelis. 2006. « The Neural Mechanisms of Gustation: A Distributed Processing Code ». *Nature Reviews. Neuroscience* 7 (11): 890-901. https://doi.org/10.1038/nrn2006.

Sinclair, J., L. Bottoms, C. Flynn, E. Bradley, G. Alexander, S. McCullagh, T. Finn, et H. T. Hurst. 2014. « The Effect of Different Durations of Carbohydrate Mouth Rinse on Cycling Performance ». *European Journal of Sport Science* 14 (3): 259-64. https://doi.org/10.1080/17461391.2013.785599.

Sinclair, J., et L. Bottoms. 2014. « The Effects of Carbohydrate and Caffeine Mouth Rinsing on Arm Crank Time-Trial Performance ». *Journal of sports research*, Conscientia Beam, 1(2): 34-44.

Singh, A. M., et W. R. Staines. 2015. « The Effects of Acute Aerobic Exercise on the Primary Motor Cortex ». *Journal of Motor Behavior* 47 (4): 328-39. https://doi.org/10.1080/00222895.2014.983450.

Small, D. M., G. Bender, M. G. Veldhuizen, K. Rudenga, D. Nachtigal, et J. Felsted. 2007. « The Role of the Human Orbitofrontal Cortex in Taste and Flavor Processing ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 1121 (1): 136-51. https://doi.org/10.1196/annals.1401.002.

Small, D. M., R. J. Zatorre, A. Dagher, A. C. Evans, et M. Jones-Gotman. 2001. « Changes in Brain Activity Related to Eating Chocolate: From Pleasure to Aversion ». *Brain: A Journal of Neurology* 124 (Pt 9): 1720-33.

Smith, J. M., et H. Misiak. 1976. « Critical Flicker Frequency (CFF) and Psychotropic Drugs in Normal Human Subjects-a Review ». *Psychopharmacologia* 47 (2): 175-82.

Sökmen, B., L. E. Armstrong, W. J. Kraemer, D. J. Casa, J. C. Dias, D. A. Judelson, et C. M. Maresh. 2008. « Caffeine use in sports: considerations for the athlete ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 22 (3): 978–986.

Spector, A. C. 2005. « The Representation of Taste Quality in the Mammalian Nervous System ». *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews* 4 (3): 143-91. https://doi.org/10.1177/1534582305280031.

Spriet, L. L. 2014. « Exercise and Sport Performance with Low Doses of Caffeine ». *Sports Medicine* 44 (S2): 175-84. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0257-8.

Sternberg, S. 1969. « The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method ». *Acta Psychologica* 30 (janvier): 276-315. https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9.

Stroop, J. R. 1935. « Studies of interference in serial verbal reactions». *Journal of Experimental Psychology, 18*(6):643-662.

Tarnopolsky, M. A. 2010. « Caffeine and Creatine Use in Sport ». *Annals of Nutrition & Metabolism* 57 Suppl 2: 1-8. https://doi.org/10.1159/000322696.

Tarnopolsky, M. A. 2008. « Effect of Caffeine on the Neuromuscular System--Potential as an Ergogenic Aid ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme* 33 (6): 1284-89. https://doi.org/10.1139/H08-121.

Tempest, G. D., K. Davranche, J. Brisswalter, S. Perrey, et R. Radel. 2017. « The Differential Effects of Prolonged Exercise upon Executive Function and Cerebral Oxygenation ». *Brain and Cognition* 113 (avril): 133-41. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.02.001.

Tharion, W. J., B. Shukitt-Hale, et H. R. Lieberman. 2003. « Caffeine Effects on Marksmanship during High-Stress Military Training with 72 Hour Sleep Deprivation ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 74 (4): 309-14.

Theios, J. «The components of response latency in simple human information processing tasks». In *Attention and Performance,* edited by *P.* Rabbitt and S. Dornic, 418-44. London: Academic Press, 1975.

Thompson, T., T. Steffert, T. Ros, J. Leach, et J. Gruzelier. 2008. « EEG Applications for Sport and Performance ». *Methods* 45 (4): 279-88. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2008.07.006.

Tieges, Z., J. Snel, A. Kok, et K. R. Ridderinkhof. 2009. « Caffeine Does Not Modulate Inhibitory Control ». *Brain and Cognition* 69 (2): 316-27. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.08.001.

Tomporowski, P. D. 2003. « Effects of Acute Bouts of Exercise on Cognition ». *Acta Psychologica* 112 (3): 297-324.

Tomporowski, P. D., et N. R. Ellis. 1986. « Effects of exercise on cognitive processes: A review. » *Psychological bulletin* 99 (3): 338.

Treisman, M. 1963. « Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the internal "clock". *Psychological Monographs* 77: 1-31.

Tucker, R. 2009. « The Anticipatory Regulation of Performance: The Physiological Basis for Pacing Strategies and the Development of a Perception-Based Model for Exercise

Performance ». *British Journal of Sports Medicine* 43 (6): 392-400. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.050799.

Turner, C. E., W. D. Byblow, C. M. Stinear, et N. Gant. 2014. « Carbohydrate in the Mouth Enhances Activation of Brain Circuitry Involved in Motor Performance and Sensory Perception ». *Appetite* 80 (septembre): 212-19. https://doi.org/10.1016/j.appet.2014.05.020.

Van Nieuwenhoven, M.A., Brummer, R.M., et Brouns, F. 2000. «Gastrointestinal function during exercise: comparison of water, sports drinks and sports drink with caffeine. *Journal of applied Physiology* 89: 1079-1085.

Vandenbogaerde, T. J., et W. G. Hopkins. 2011. « Effects of Acute Carbohydrate Supplementation on Endurance Performance: A Meta-Analysis ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 41 (9): 773-92. https://doi.org/10.2165/11590520-000000000-00000.

Veasey, R., C. Haskell-Ramsay, D. Kennedy, K. Wishart, S. Maggini, C. Fuchs, et E. Stevenson. 2015. « The Effects of Supplementation with a Vitamin and Mineral Complex with Guaraná Prior to Fasted Exercise on Affect, Exertion, Cognitive Performance, and Substrate Metabolism: A Randomized Controlled Trial ». *Nutrients* 7 (8): 6109-27. https://doi.org/10.3390/nu7085272.

Walter, W. G., R. Cooper, V. J. Aldridge, W. C. McCallum, et A. L. Winter. 1964. « Contingent Negative Variation : An Electric Sign of Sensori-Motor Association and Expectancy in the Human Brain ». *Nature* 203 (juillet): 380.

Wang, C. C., C. H. Chu, I. H. Chu, K. H. Chan, et Y. K. Chang. 2013. « Executive Function during Acute Exercise: The Role of Exercise Intensity ». *Journal of Sport & Exercise Psychology* 35 (4): 358-67.

Watson, P., D. Nichols, et P. Cordery. 2014. « Mouth Rinsing with a Carbohydrate Solution Does Not Influence Cycle Time Trial Performance in the Heat ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme* 39 (9): 1064-69. https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0413.

Wearden, J. H., et I. S. Penton-Voak. 1995. « Feeling the Heat: Body Temperature and the Rate of Subjective Time, Revisited ». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B, Comparative and Physiological Psychology* 48 (2): 129-41.

Welsh, R. S., J. M. Davis, J. R. Burke, et H. G. Williams. 2002. « Carbohydrates and Physical/Mental Performance during Intermittent Exercise to Fatigue ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34 (4): 723-31.

Whitham, M., et J. McKinney. 2007. « Effect of a Carbohydrate Mouthwash on Running Time-Trial Performance ». *Journal of Sports Sciences* 25 (12): 1385-92. https://doi.org/10.1080/02640410601113676.

Wickham, K. A., et L. L. Spriet. 2018. « Administration of Caffeine in Alternate Forms ». *Sports Medicine* 48 (S1): 79-91. https://doi.org/10.1007/s40279-017-0848-2.

Winnick, J. J., J. M. Davis, R. S. Welsh, M. D. Carmichael, E. A. Murphy, et J. A. Blackmon. 2005. « Carbohydrate Feedings during Team Sport Exercise Preserve Physical and CNS Function ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37 (2): 306-15.

Wright, B. F., et G. Davison. 2013. « Carbohydrate Mouth Rinse Improves 1.5 h Run Performance: Is There A Dose-Effect? » *International Journal of Exercise Science* 6 (4): 328.

Yerkes, R. M., et J. D. Dodson. 1908. « The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation ». *Journal of comparative neurology* 18 (5): 459–482.

Young, H. A., et D. Benton. 2018. « Heart-Rate Variability: A Biomarker to Study the Influence of Nutrition on Physiological and Psychological Health? » *Behavioural Pharmacology* 29 (2 and 3-Special Issue): 140-51. https://doi.org/10.1097/FBP.0000000000000383.

Influence de stratégies nutritionnelles sur le fonctionnement cognitif au cours d'une sollicitation physiologique

Résumé

Dans de nombreuses disciplines sportives, la performance dépend de l'efficacité des processus à la fois, cognitifs et physiologiques, sollicités dans l'action. Diverses recommandations nutritionnelles sont régulièrement émises afin d'optimiser les aspects énergétiques de la performance, mais l'efficacité de différents nutriments sur le fonctionnement cognitif, dans un contexte exigeant à la fois en termes de sollicitation physique et de charge cognitive reste peu explorée.

Dans ce cadre, le questionnement de ce travail de thèse a été de savoir si l'utilisation de supplémentations nutritionnelles pouvait potentialiser l'effet de l'exercice sur le fonctionnement cognitif, qui est globalement positif et de faible magnitude. Nous avons choisi d'analyser les effets de trois supplémentations nutritionnelles, à savoir les hydrates de carbone, la caféine et le guarana, qui sont classiquement consommées par les sportifs tout en respectant les valeurs éthiques sportives. Dans ce cadre, l'efficacité du traitement de l'information sensorimotrice lors des tâches de temps de réaction ainsi que le contrôle cognitif de l'exécution ont été mesurés grâce au paradigme de la chronométrie mentale. Par ailleurs, le traitement temporel a aussi été investigué car d'une part il s'agit d'une fonction essentielle pour de nombreuses activités motrices, mais aussi car ce paradigme est considéré comme une mesure indirecte des variations du niveau d'éveil. Ces travaux rapportent cinq études destinées à évaluer l'effet de ces supplémentations sur le fonctionnement cognitif.

Dans une première étude, nous avons évalué l'effet de l'ingestion d'un composé de guarana enrichi en vitamines et minéraux (300 mg) et de caféine (100 mg), sur la performance cognitive ainsi que sur la fonction du système nerveux autonome au repos. Nos résultats suggèrent que l'ingestion de guarana améliore le traitement de l'information de 30 à 90 minutes après ingestion, avec un effet maximal à 45 minutes (+5%, Δ = 15 ms). Elle permet aussi un maintien de la modulation parasympathique significativement plus important que le placebo (Pl) malgré l'augmentation de la charge mentale.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous avons réalisé 4 études afin d'investiguer l'effet d'hydrates de carbone, de caféine et de guarana sur le fonctionnement cérébral, en rinçage de bouche ou en ingestion, pendant ou après un exercice physique. Nos résultats suggèrent d'une part, que l'ingestion d'hydrates de carbone ou d'un complexe guarana-créatine améliore la performance d'un exercice anaérobie (respectivement +4% et +3%) (études n°2 et n°3). D'autre part, l'ingestion d'hydrates de carbone, de caféine ou de guarana améliore la vitesse de traitement de l'information lors de tâches de temps de réaction de choix dès la fin d'un exercice sous-maximal de 40 minutes (hydrates de carbone = +6%, Δ = 20 ms ; caféine = +6%, Δ = 20 ms ; guarana = +4%, Δ = 12 ms) (étude n°5). Cet effet pourrait être induit par une augmentation du niveau d'éveil (étude n°4). L'ingestion de caféine ou de guarana entraîne aussi une élévation moins importante de l'effort perçu au cours d'un exercice (respectivement -8% et -12%) (étude n°5). Enfin, les résultats sur l'utilisation la caféine en rinçage de bouche sont particulièrement encourageants puisqu'ils suggèrent une amélioration du contrôle de l'interférence au cours d'un exercice sous-maximal (étude n°4).

L'ensemble de ces résultats indique une potentialisation de l'effet de l'exercice sur la performance cognitive. Il suggère aussi que la mise en place de supplémentations nutritionnelles lors d'un exercice améliore l'efficacité de processus cognitifs qui s'avèrent être essentiels à la performance sportive.

Mots clés **:** nutrition, exercice, performance cognitive, hydrates de carbone, caféine, guarana, contrôle cognitif, traitement de l'information, traitement temporel.

Abstract

Studying the interaction between exercise and cognition and how to apply the learnings to athletes goes back to the early days of cognitive psychology and sport physiology. Indeed, in many sporting disciplines, the athlete's performance is directly correlated to the efficiency of cognitive and physiological processes engaged in action. At the same time, knowledgeable companies are making and updating various nutritional recommendations to optimise the energy aspects of performance. However, the effectiveness of the various nutrients on the cognitive functioning, in a demanding context, both in terms of physical solicitation and cognitive load, remains under explored.

As such, the inherent questioning in this thesis was to understand whether the use of nutritional supplements could increase the impact of exercise on cognitive functioning, regarded as lowly positive. We chose to analyse the effects of three nutritional supplements, namely carbohydrates, caffeine and guarana, traditionally consumed by athletes while respecting ethical sport values. In this context, the efficiency of the sensory-motor information processing during the reaction time tasks as well as the efficiency of the inhibition processes were measured by the use of the mental chronometry paradigm. Moreover, we also studied the processing of temporal information because this paradigm is considered as an indirect measure of arousal. We developed five studies designed to evaluate the effect of these supplements on cognitive functioning.

The first study aimed at assessing cognitive performance and heart rate variability following the ingestion of a multi-vitamin guarana complex (300mg), and caffeine (100mg). Results highlight an enhancement of information processing between 30 and 90 minutes after guarana ingestion, with a greatest effect 45 minutes after ingestion (+5%, Δ = 15 ms). Furthermore, guarana ingestion is accompanied by a stable autonomic nervous system regulation, regardless of mental load raises.

In the second section of this thesis, 4 studies investigated the effect of carbohydrates, caffeine and guarana ingestion or mouth rinsing on cognitive function, during or at the end of exercise. Our results highlight that carbohydrate and guarana/creatine complex ingestion improve maximal power output (respectively +4% and +3%) (studies #2 and #3). Additionally, carbohydrates, caffeine and guarana enhance speed of information processing during a decision-making task, at the end of a sub-maximal 40-minutes exercise (carbohydrate = +6%, Δ = 20 ms ; caffeine = +6%, Δ = 20 ms ; guarana = +4%, Δ = 12 ms). This improvement may be induced by an increase of arousal (study #4). A decrease of perceived exertion during exercise has been reported with caffeine and guarana ingestion (respectively -8% and -12%) (study #5). Finally caffeine mouth rinsing seems worthwhile since an enhancement of cognitive control has been reported after use during exercise (study #4).

In conclusion, our results indicate the potentiation of exercise effects on cognitive function. Furthermore, they suggest nutritional supplements could enhance cognitive processes during exercise in what may be a predictive factor of performance enhancement.

Keywords: nutrition, exercise, cognitive function, caffeine, guarana, carbohydrates, information processing, cognitive control, temporal processing.