



**HAL**  
open science

# Caractérisation de la sensibilité au stress et détermination des moyens de remédiation par stimulations cognitives et cérébrales

Sophie Schlatter

► **To cite this version:**

Sophie Schlatter. Caractérisation de la sensibilité au stress et détermination des moyens de remédiation par stimulations cognitives et cérébrales. Neurosciences. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE1217 . tel-03662748

**HAL Id: tel-03662748**

**<https://theses.hal.science/tel-03662748>**

Submitted on 9 May 2022

**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.

N°d'ordre NNT :  
2021LYSE1217



**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 205**  
**École doctorale interdisciplinaire Sciences-Santé - EDISS**

**Spécialité de doctorat** : STAPS  
**Discipline** : Neurosciences Comportementales

Soutenue publiquement le 18/10/2021, par :  
**Sophie Thérèse Schlatter**

---

**Caractérisation de la sensibilité au  
stress et détermination des moyens de  
remédiation par stimulations cognitives  
et cérébrales**

---

Devant le jury composé de :

Nom, prénom	grade/qualité	établissement/entreprise	
LUPIEN, Sonia	PU	Institut Universitaire en Santé Mentale de Montréal, Département of Psychiatry and Addictology, Montréal	<a href="#">Président.e</a>
PELLISSIER, Sonia	MCU-HDR	Laboratoire Inter-Universitaire de Psychologie Personnalité, Cognition, Changement Social, Grenoble/Chambery	<a href="#">Rapporteure</a>
TROUSSELARD, Marion	MCS Pr	Ecole du Val-de-Grâce Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Neurophysiology of Stress, Paris	<a href="#">Rapporteure</a>
GROSPRÊTRE, Sidney	MCU	Laboratoire C3S Culture, Sport, Santé, Société, Université de Franche Comté, Besançon	<a href="#">Examinatrice</a>
MAZZA, Stéphanie	PU	Laboratoire Research on Healthcare Performance, INSERM U1290, Université Lyon 1	<a href="#">Examinateur</a>
LEHOT, Jean-Jacques	PU-PH	Laboratoire Research on Healthcare Performance, INSERM U1290, Centre Lyonnais d'Enseignement par la Simulation en Santé Université Lyon 1	<a href="#">Examinatrice</a>
GUILLOT, Aymeric	PU	Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424 Université Lyon 1	<a href="#">Examinateur</a>
DEBARNOT, Ursula	MCU-HDR	Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité EA 7424 Universitaire de France, Université Lyon 1	<a href="#">Directeur de thèse</a>
LILOT, Marc	MCU-PH	Faculté de Médecine Lyon Est, Centre Lyonnais d'Enseignement par la Simulation en Santé, Université Lyon 1	<a href="#">Co-directrice de thèse</a>
			<a href="#">Invité</a>



## Résumé

Le stress survient lorsque les exigences d'une situation dépassent la capacité d'adaptation individuelle. Le stress est une cause majeure d'invalidité due à ses effets néfastes sur les fonctions exécutives et ses complications sur la santé psychique et physique. Notre approche pluridisciplinaire s'ancre dans la continuité des récents travaux questionnant ses impacts, les outils de remédiation, et les sensibilités individuelles au stress. Le 1<sup>er</sup> objectif de cette thèse était de déterminer l'impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie motrice (études 1, 2). Nos résultats montrent un maintien des capacités explicites et une détérioration des capacités implicites pendant et suite à un évènement stressant. Le 2<sup>nd</sup> objectif était de caractériser la période d'anticipation d'un évènement stressant, pour cela nous avons créé et testé un nouveau protocole le *Trier Social Anticipatory Stress Test* (étude 3). Alors que peu de moyens d'action sont envisagés pour faire face au stress aigu, le traitement habituel d'un stress chronique repose principalement sur une prise en charge médicamenteuse et des thérapies comportementales. Ces traitements peuvent entraîner des effets secondaires, des résistances et souffrir d'une faible adhésion. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles approches non-invasives. Le 3<sup>ème</sup> objectif était d'explorer des techniques de remédiation du stress (études 3, 4, 5, 6). Nous avons comparé l'efficacité de 4 techniques de gestion émotionnelles administrées pendant un stress d'anticipation : respiration relaxante (RESPIRATION), rétrocontrôle biologique cardiaque (VFC-RETRO), stimulation cérébrale du cortex préfrontal dorsolatéral (STCC), VFC-RETRO couplé à la STCC (VFC-RETRO + STCC). Ces techniques ont été explorées au laboratoire et durant un stress professionnel médical (simulation de soins critiques). Nos résultats indiquent que les interventions ont des effets psychophysiologiques et comportementaux spécifiques. Hormis la STCC, elles sont toutes efficaces pour réduire le stress. Comparativement à une condition contrôle, 5 min de RESPIRATION permettent d'augmenter la relaxation subjective et objective durant l'anticipation. Lorsque la respiration est couplée à un VFC-RETRO, on observe une augmentation significativement plus importante de ces marqueurs. Comparativement à une condition contrôle, 15 min de VFC-RETRO augmentent la variabilité de la fréquence cardiaque et réduit le ressenti global de stress (études 3, 4). Un couplage VFC-RETRO + STCC permet de potentialiser ces effets, d'induire une relaxation immédiate et une réduction du stress global plus importante. Concernant les performances, la RESPIRATION et le VFC-RETRO permettent d'améliorer les ressentis subjectifs de performances (études 3, 4, 5, 6). L'impact positif objectif du VFC-RETRO sur les fonctions exécutives est confirmé uniquement lorsque le niveau de base des individus est pris en compte (étude 4). Ces résultats permettent d'envisager la mise en place de techniques de remédiation du stress à grande échelle, même si les réponses de stress font l'objet de variabilités interindividuelles qui doivent être considérées. Ainsi, le 4<sup>ème</sup> objectif était d'évaluer l'influence de la personnalité sur la sensibilité au stress et l'efficacité des techniques de gestion émotionnelle (étude 7). Nos résultats montrent que les traits de névrosisme, d'extraversion et le caractère consciencieux sont importants à prendre en compte. Nos études démontrent pour la première fois l'intérêt des interventions préventives de très courtes durées, pour prévenir les réponses psychophysiologiques (VFC-RETRO + STCC > VFC-RETRO > RESPIRATION) et les détériorations cognitives fréquemment observées lors d'un stress aigu. Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives dans le traitement préventif et individualisé des maladies associées au stress.

**Mots clés :** Anticipation, Coping, Imagerie Motrice, Personnalité, Rétrocontrôle, Simulation, STCC, Stress

## Summary

Stress occurs when situational demands exceed the individual's ability. Stress is a major cause of disability due to its detrimental effects on executive functions and its complications on psychological and physical health. Our multidisciplinary approach is in line with recent works seeking the impacts, remediation tools, and stress-related individual sensitivities. The first aim of this thesis was to determine the impact of acute stress on motor imagery ability (studies 1,2). Our results showed a deterioration of implicit motor imagery abilities following a stressful event and a maintenance of explicit abilities both during and following stress. The 2<sup>nd</sup> goal of our work was to characterize the stress anticipation period by developing a new tool: the Trier Social Anticipatory Stress test. While few interventions are designed to deal with acute stress, the usual treatment of chronic stress mainly relies on medication and behavioral therapies. These treatments can elicit side effects, resistance and poor adherence. It is therefore necessary to find non-invasive alternatives. The 3<sup>rd</sup> main was thus to explore several stress remediation techniques (studies 3,4,5,6). We compared the effectiveness of four coping techniques administered during an anticipatory stress period: relaxing breathing (BREATHING), cardiac biofeedback (BFB), dorsolateral prefrontal cortex cerebral stimulation (tDCS), cardiac biofeedback paired with tDCS (BFB + tDCS). These techniques were explored in the laboratory (studies 3,4) or during a medical occupational stress (critical care simulation) (studies 5,6,7). Our results indicate that the interventions have specific psychophysiological and behavioral effects. With the exception of tDCS, they are all effective for reducing stress. Compared to a control condition, 5 min of BREATHING increases subjective and objective relaxation during anticipation (studies 5,6), when breathing is paired with a BFB, a significantly greater increase is observed (studies 6). Compared to a control condition, 15 min of BFB increase heart rate variability and reduce the global feeling of stress (studies 3,4). The additional tDCS potentiates BFB effects, inducing immediate relaxation and a greater reduction in overall stress (studies 4). Concerning performance, BREATH and BFB improve subjective feelings of performance (studies 3,4,6). While some of our studies objectivate this increase in performance (studies 5,4), others show no difference with the control group (studies 3,6). When individuals baseline level is considered, the positive impact of BFB on executive functions is confirmed (studies 4). These results make it possible to envisage the implementation of large-scale stress remediation techniques, although stress responses remain subjected to inter-individual variability. Thus, the 4<sup>th</sup> goal was to evaluate the influence of personality on stress sensitivity and the effectiveness of emotional management techniques (studies 7). Our results show that neuroticism, extraversion, and conscientiousness are important traits to consider. Our studies demonstrate, for the first time, the interest of very short duration proactive interventions, to prevent psychophysiological responses (BFB + STCC > BFB > BREATH) and cognitive deteriorations (BFB) which are frequently observed during acute stress. This work offers fruitful perspectives in preventive and individualized treatment of stress-related diseases.

**Key words:** Anticipation, Biofeedback, Coping, Motor Imagery, Personality, Simulation, Stress, tDCS

## Laboratoire d'accueil

Unité de recherche : Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424,  
University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

Directeur : Guillaume Millet

Directeurs adjoints : Christophe Hautier, Frédérique Hintzy, Thomas Lapole

Responsable d'équipe MP3 : Aymeric Guillot



## **Liens d'intérêt**

Je déclare n'avoir aucun lien d'intérêt financier et non financier en rapport avec les travaux exposés dans cette thèse.

## Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement Mesdames Sonia Lupien et Sonia Pellissier qui, malgré le fait de ne pas connaître en amont ce travail et notre équipe, ont gentiment accepté d'être jury et rapporteur. Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury, Professeure Stéphanie Mazza, Médecin cheffe des Services Marion Trousselard, Professeur Jean-Jacques Lehot, et Monsieur Sidney Grosprêtre. C'est un réel honneur pour moi d'avoir un jury tenu en si haute estime dans nos domaines d'expertise. Par ailleurs, je remercie Monsieur Philip Jackson d'avoir accepté à deux reprises d'être jury lors de mes comités de suivis de thèse.

### **Aux membres du CLESS,**

Je remercie bien évidemment, toute l'équipe du CLESS et en particulier Monsieur Lehot, co-directeur du CLESS, qui en plus du grand soutien apporté au cours de ces trois dernières années, me fait l'honneur d'apporter son expertise du milieu médical et de la simulation à cette soutenance. Je remercie à cette même occasion, Monsieur Thomas Rimmelé co-directeur du CLESS, pour ses nombreuses relectures, ses encouragements, et ses conseils avisés. Merci à Lucas Denoyel, et Sébastien Sigel pour leur sympathie et l'aide apportée au quotidien. Je suis évidemment reconnaissante de l'intérêt porté initialement par le Docteur Lilot sur nos recherches menées au LIBM. Nos centres d'intérêts partagés nous ont permis de construire ensemble des projets innovants et pluridisciplinaires. Ce fut une belle expérience professionnelle à vos côtés, merci à tous de m'avoir intégrée dans votre équipe. Comment remercier l'équipe du CLESS, sans penser à vous Corentin et Simon. Merci d'avoir été mes bras droits quand les journées étaient longues et éprouvantes. J'ai découvert des personnes sincères, drôles et dignes de confiance. Merci de votre écoute bienveillante.

### **A mes directeurs Aymeric Guillot et Ursula Debarnot,**

Je vous remercie pour ces quatre belles années partagées. Je mesure la chance que j'ai eue de vous avoir comme directeurs de thèse, tant sur la qualité de la formation scientifique que sur vos qualités humaines. J'ai pu jouir d'une très grande liberté dans les prises de décisions ce qui, je le sais, est le reflet de votre confiance dans mon travail. Je vous félicite, pour vos belles réussites qui ont eu lieu durant cette thèse, Ursula pour ton IUF et toi Aymeric pour la reconnaissance de ton expertise au plus haut rang. J'ai beaucoup appris à vos côtés, le chemin me paraît encore long, toutefois je sais que vous serez là pour m'épauler. Merci de m'avoir soutenue dans des choix ambitieux et incertains. Merci d'avoir toujours accueilli mes idées, mes remarques, mes critiques avec bienveillance. Merci de m'avoir -gentiment- recadrée quand ma nature multitâche devenait contre-productive. Aymeric, je te remercie pour tes encouragements, ton écoute, j'ai une confiance absolue en toi et un grand respect pour la



personne que tu es. Ursula, merci pour ces innombrables relectures, les élans de motivations, les discussions animées, et ta présence amicale au quotidien <sup>1</sup>.

### **A mes tuteurs,**

Mes enseignants passionnés et inspirants. Malgré mes difficultés vous avez su croire en moi, me pousser et surtout faire naître des passions. Parmi tant de rencontres, certaines sont inoubliables : Madame Lami, Monique, Monsieur Tanzarella.

### **A mes collègues,**

Je tiens à remercier officiellement Monsieur Christian Collet d'avoir sélectionné ma candidature pour le Master MPSI et de m'avoir accompagnée dans les premiers pas de cette expérience. Je tenais également à remercier, Monsieur Christophe Hautier, directeur du LIBM de Lyon, pour son soutien et ses lettres de recommandations.

Merci à Brice Canada du L-VIS, Damien Claverie de l'IRBA, et Damien Saboul, d'avoir partagé avec moi leur expertise sur la personnalité et le traitement de données physiologiques.

Je tiens à remercier sincèrement, l'ensemble de mes collègues du LIBM et plus particulièrement Alex, Arnaud, Benoit, Franck, Robin, Vincent, Yoann pour les conseils en statistiques, l'aide sur les dosages, les codes matlab, et le volontariat pour les *afterwork* <sup>2</sup>.

Tous nos collègues et plus particulièrement ceux qui ont accepté d'endosser le rôle du mauvais flic : Alex, Angèle, Benoit, Brice, Camille, Etienne, Elodie, Mathilde, Marc, Matthieu, Mélanie, Robin, Yann, Yoann ...

Un très grand merci à mes stagiaires et collaborateurs les plus proches. Je vous suis très reconnaissante pour votre efficacité, votre conscienciosité, votre pertinence, et votre implication. Lyona, Julien, Marlène, merci pour votre aide précieuse. Laura Schmidt et Sara Trapero, vous avez été formidables. Laura je suis fière que tu te sois lancée dans cette aventure, Sara je suis sûre que nos routes se croiseront de nouveau.

Mathilde, nous avons commencé l'aventure face à face en concurrente, nous terminons cette première étape ensemble, en amie. Je ne connais pas, mise à part Chon peut-être, de personne plus serviable et dévouée. Ta gentillesse est reconnue par tous nos collègues et amis. Je te souhaite tout ce qu'on peut espérer de mieux pour ta vie personnelle et professionnelle. Angèle, cette dernière année passée à côté a été une très belle surprise, tu es une collègue exemplaire, cultivée, serviable, pertinente. Il est cependant dommageable que ton vocabulaire soit si désastreux, en effet je dois l'écrire une fois pour toute mais non « il est tout plout plout » ou encore « j'aime quand c'est tout sploch sploch » ça ne veut rien dire. Marion, merci pour ton soutien, ton écoute et tes conseils. Benoît, merci d'avoir été là dans ces premiers mois difficiles et de partager ton cynisme bienveillant avec moi.

Je tenais également à remercier tous mes participants et étudiants, en espérant que leurs participations à nos expériences ou à mes cours ont été enrichissantes.



---

<sup>1</sup> Ne souhaitant pas te mettre en cause dans le corps de texte, tu trouveras une seconde dédicace : alors je ne te dis pas : « Mouai, bof, ou encore le très fameux : c'est moche », et je te passe le bonhomme qui lève les bras, mais juste un simple et sincère merci (et un smiley). J'espère que lorsqu'un beau jour je découvrirai ma ride du pied je serai aussi IUF.

<sup>2</sup> Les collègues concernées se reconnaîtront. Merci d'avoir accepté ma compagnie pour des dégustations rafraichissantes.

### **A ma famille,**

Mon père, naturaliste, autodidacte et érudit, mon premier professeur.

Ma mère, seule rescapée de la famille de la malédiction des Dys –slexisue –orthographe et j'en passe. Elle nous a courageusement accompagnées dans de multiples et interminables corrections. De l'affreuse dictée en primaire, jusqu'aux dernières lignes de ce manuscrit, son expertise a été indispensable. Merci ma petite maman, de m'avoir toujours soutenue et cru en moi.

Mes sœurs, Marie la grande, l'aînée celle que l'on suit, et que l'on admire. Celle qui se donne corps et âme pour sauver la *Pacha Mama*. Il n'y a pas de plus grande et belle ambition.

Anne, la jumelle, l'aînée aussi. Celle qui touche sans toucher. Celle qu'on n'a pas assez écoutée. Celle qui a pourtant tant à dire. Celle qui surprend, qui sait, qui trouve. Celle pour qui on espère, celle pour qui on avance, celle pour qui on travaille. Je suis très fière de toi aujourd'hui.

Mes cousines. Une famille soudée comme cela est un don inestimable dans cette drôle de vie. Continuons à grandir, danser, et aimer ensemble.

Mes grands-mères, avec lesquelles j'aurais aimé partager cette aventure. Mamie Thérèse ton discours était toujours impeccable, sans ombre de jugement, et une fierté dans ta famille qui resplendissait. Mamie Janine, merci pour ces doux souvenirs d'enfance.

### **A mes proches,**

Matthieu, merci d'avoir tenu ce marathon auprès de moi, toujours très compréhensif sur l'investissement que j'ai mis dans mon travail, et d'un grand soutien auprès de ma famille. Merci pour les rares et donc si précieuses pauses que nous nous sommes accordées.

Mes ami.e.s de toujours, Laura, Mylène, Maeva, Cindy, Florence, Paul, Kelly ... J'ai de la chance de vous avoir auprès de moi depuis si longtemps. Félicitations à tous mes proches qui ont mis au monde ces jolis et doux petits êtres pendant ces trois années.

Chon et Coco, vous aussi en route pour l'aventure. Que de soutien, que de force, merci. J'ai un dicton pour nous trois ici, je pense qu'il vous plaira : « *Ever tried. Ever failed. No matter. Try again. Fail again. Fail better* » Beckett (1983). Cette dédicace ne casse pas trois pattes à un arachnide mais en communication vous connaissez mes compétences qui ne sont pas forcément équivalentes à celles d'autres grands singes. J'espère vous avoir près de moi encore longtemps. A tous mes proches pour lesquels je n'étais pas assez présente, pardon, je souhaite que la fin de cette aventure s'accompagne d'une plus grande présence auprès de vous.

***Je dédie cette thèse à toutes celles et ceux qui se battent au quotidien.  
En espérant que les recherches actuelles et futures offriront de belles avancées en  
psychiatrie.***

## Publications et communications

### Publications relatives à ces travaux de thèse

#### Articles publiés

Schlatter S, Guillot A, Schmidt L, Mura M, Trama R, DiRienzo F, Lilot M, Debarnot U. Combining Proactive Transcranial Stimulation and Cardiac Biofeedback to Substantially Manage Harmful Stress Effects. *Brain Stimulation* (IF 8.95), 14, 1348-1392, 2021 [doi.org/10.1016/j.brs.2021.08.019](https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.08.019)

Schlatter S, Schmidt L, Lilot M, Guillot A, Debarnot U. Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: Psychological and physiological effects on anticipatory stress. *Behaviour Research & Therapy* (IF 4.47), 103834, 2021 [doi.org/10.1016/j.brat.2021.103834](https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103834)

Schlatter S, Guillot A, Faes C, Saruco E, Collet C, DiRienzo F, Debarnot U. Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study. *International Journal of Psychophysiology* (IF 2.99), 152, 62-71, 2020 [doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011](https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011)

#### Articles en cours de publication

Schlatter S, Louisy S, Canada B, Therond C, Guillot A, Duclos A, Blakeley C, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Influence of personality traits on anticipatory anxiety and preventive interventions to cope with stress.

Schlatter S, Therond C, Guillot A, Duclos A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effects of relaxing breathing paired with cardiac biofeedback on performance and relaxation during critical simulated situations: A prospective randomized controlled trial. *BMC Medical Education*

#### Résumé publié

Schlatter S, Therond C, Guillot A, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effects of standardized breathing and biofeedback on performance of anaesthesiologist residents during high fidelity simulation. *European Journal of Anaesthesiology* (IF 2.8), 31, p.410, 2020

#### Livres

Ouvrage : *Simulations et Exercices de crises, Modélisations, Apprentissages, Anticipation et Gestion des crises* - publication courant 2022 :

Schlatter S, Evain JN, Lilot M, Rimmelé T, Debarnot U, Guillot A, Lehot JJ. Amélioration des performances cliniques en situation critique : gérer le stress par des approches centrées sur la situation.

Schlatter S, Lilot M, Evain JN, Rimmelé T, Debarnot U, Guillot A, Lehot JJ. Amélioration des performances cliniques en situation critique : réduire le stress en contrôlant mieux les émotions.

Lilot M, Schlatter S, Evain JN, Paraschiv A, Debarnot U, Guillot A, Rimmelé T, Lehot JJ. Simulation haute-fidélité en santé : caractérisation du stress et impact sur les performances.

Lilot M, Schlatter S, Evain JN, Paraschiv A, Guillot A, Debarnot U, Rimmelé T, Lehot JJ. Ouverture vers la simulation en santé immersive de demain.

Ouvrage : *Les apprentissages en simulation ActuGORSSA* – publication novembre 2021 :

Lehot JJ, Aigle L, Schlatter S, Paraschiv A. Première partie: La simulation, outil d'apprentissage en santé

### **Communications orales (congrès)**

Schlatter S, Schmidt L, Guillot A, Debarnot U. Impacts of real-time cardiac biofeedback on anticipatory stress. *Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS)*, 27-29 Oct 2021

Schlatter S, Therond C, Louisy S, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effets d'un exercice de respiration standardisée et d'un rétrocontrôle biologique sur les performances techniques des internes d'anesthésie-réanimation lors d'une simulation haute-fidélité. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, 23-25 Sept 2021

Koca A, Schlatter S, Quentin Delas, Lehot JJ, Lilot M, Rimmelé T. Le Facilitateur et l'Apprenant Perçoivent Différemment l'Aide Apportée par le Facilitateur en Simulation Haute-Fidélité. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, 23-25 Sept 2021

Schlatter S, Therond C, Louisy S, Guillot A, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effets d'un exercice de respiration standardisée et d'un rétrocontrôle biologique sur les performances des internes d'anesthésie-réanimation lors d'une simulation haute-fidélité. *Société Francophone de simulation en Santé d'Anesthésie et de Réanimation*, 23-24 Juin 2021

Louisy S, Schlatter S, Therond C, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Apport des techniques de respiration standardisées et du rétrocontrôle visuel sur le stress d'anticipation des internes d'anesthésie-réanimation en simulation haute-fidélité. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, 24-26 Sept 2020

Schlatter S, Therond C, Guillot A, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effects of standardized breathing and biofeedback on performance of anaesthesiologist residents during high fidelity simulation. *Euroanaesthesia*, Oct 2020

Schlatter S, Guillot A, Collet C, Debarnot U. Effets d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie motrice. *Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS)*, Oct 2019

### **Communications orales (séminaires)**

Schlatter S, Guillot A, Debarnot U. Characterization of stress sensitivity and determination of coping techniques. *LIBM seminar*, Sept 2021

Schlatter S, Guillot A, Lilot M, Debarnot U. Impact of biofeedback on stress and performance: from the laboratory to the field. *RESHAPE seminar*, Fév 2021

Schlatter S, Guillot A, Schmidt L, Faes C, Brice C, Lilot M, Debarnot U. Impacts of acute stress on fine motor skills. *LIBM seminar*, Nov 2020

Schlatter S, Guillot A, Debarnot U, Lilot M. Pratique de la cohérence cardiaque pour le contrôle des émotions et l'amélioration des performances. *Service de Santé Universitaire, Université Lyon 1*, Déc 2020

Schlatter S, Guillot A, Schmidt L, Lilot M, Debarnot U. Diminution de la sensibilité au stress. *Séminaire cardiologie Hôpital Louis Pradel*, Mars 2020

### Communications écrites (congrès)

Therond C, Schlatter S, Louisy S, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Impact des traits psychométriques individuels sur le stress ressenti au cours d'une simulation haute-fidélité chez des internes d'anesthésie-réanimation. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, 23-25 Sept 2021

Louisy S, Schlatter S, Therond C, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Évaluation d'une technique de respiration standardisée couplée ou non à un rétrocontrôle visuel sur le stress d'anticipation des internes d'anesthésie-réanimation en simulation haute-fidélité. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, 23-25 Sept 2021

Koca A, Schlatter S, Quentin Delas, Lehot JJ, Lilot M, Rimmelé T. Influence du Facilitateur sur les Performances Techniques et Non-Techniques lors de Situations Critiques Simulées. *Société Francophone de Simulation en Santé*, 23-25 Sept 2021

Schlatter S, Therond C, Louisy S, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. Effets d'un exercice de respiration standardisée et d'un rétrocontrôle biologique sur les performances des internes d'anesthésie-réanimation lors d'une simulation haute-fidélité : étude pilote. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, Sept 2020

Therond C, Schlatter S, Louisy S, Guillot A, Lehot JJ, Rimmelé T, Debarnot U, Lilot M. - Niveau de stress, personnalité, psychométrie d'anxiété, et intérêt pour la gestion du stress chez des internes d'Anesthésie-réanimation au cours de la simulation haute-fidélité. *Société Française d'Anesthésie et de Réanimation*, Sept 2020

Schlatter S, Faes C, Brice C, Collet C, Guillot A, Debarnot U. Decrease response to stress: neuroplasticity induced by brain stimulation and biofeedback. *Journée de la Structure Fédérative de Recherche Santé Lyon Est*, Mars 2019

Schlatter S, Faes C, Brice C, Collet C, Guillot A, Debarnot U. Diminution de la sensibilité au stress par des stimulations cérébrales et des rétrocontrôles biologiques. *Journée de l'Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences Santé*, Oct 2018

### Publications relatives à des travaux antérieurs à la thèse

Debarnot U, Schlatter S, Monteil J, Guillot A. Early stimulation of the left posterior parietal cortex promotes representation change in problem solving. *Scientific Reports* (IF 3.99), 9, 16523, 2019 [doi.org/10.1038/s41598-019-52668-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-52668-7)

Hare R, Schlatter S, Rhodes G, Simmons L. Putative sex-specific human pheromones do not affect gender perception, attractiveness ratings or unfaithfulness judgements of opposite sex faces. *Royal Society Open Science* (IF 2.50), 4, 160831, 2017 [doi.org/10.1098/rsos.160831](https://doi.org/10.1098/rsos.160831)

<b>1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>21</b>
1.1.	<i>Définition du stress.....</i>	21
1.1.1.	Stresseurs et réponse de stress.....	21
1.1.2.	Différences : challenge et menace, stress et anxiété.....	23
1.1.3.	Anticipation, stress et récupération.....	24
1.1.4.	Marqueurs et outils de mesure du stress.....	25
1.1.4.1.	Outils de mesure du stress aigu psychologique.....	25
1.1.4.1.1.	Echelles visuelles analogiques.....	25
1.1.4.1.2.	Auto-questionnaires.....	26
1.1.4.1.3.	Avantages et limites des mesures subjectives.....	27
1.1.4.2.	Marqueurs et outils de mesure du stress aigu physiologique.....	28
1.1.4.2.1.	Les niveaux d'activation cérébrale.....	29
1.1.4.2.2.	Réseaux impliqués dans la réponse de stress aigu.....	30
1.1.4.2.3.	Réponse cérébrale de stress aigu.....	32
1.1.4.2.3.1.	Récepteurs aux glucocorticoïdes.....	32
1.1.4.2.3.2.	Stress, structures corticales et sous-corticales.....	33
1.1.4.2.4.	Réponses du système nerveux autonome.....	33
1.1.4.2.4.1.	Activation du système sympathique adrénomédullaire (SSAM).....	34
1.1.4.2.4.1.1.	Conductance cutanée, diamètre de la pupille, alpha-amylase.....	34
1.1.4.2.4.1.2.	Paramètres cardiovasculaires.....	35
1.1.4.2.4.2.	Activation de l'axe hypothalamo-hypophysaire adrénocortical (HHAC).....	38
1.1.4.2.5.	Modérateurs de l'axe HHAC.....	39
1.1.4.2.6.	Avantages et limites des mesures physiologiques.....	42
1.1.5.	Inductions du stress.....	43
1.1.5.1.	Stresseurs psychologiques.....	43
1.1.5.1.1.	Inductions par visionnage d'images et imagerie.....	43
1.1.5.1.2.	Inductions par des tâches cognitives.....	44
1.1.5.1.3.	Inductions par des tâches d'expressions publiques.....	45
1.1.5.1.4.	Trier Social Stress Test.....	45
1.1.5.2.	Stresseurs physiques.....	45
1.1.5.3.	Inductions par injections.....	46
1.1.5.4.	Stresseurs psychophysiologiques.....	46
1.1.5.5.	Simulations écologiques.....	46
1.1.5.6.	Etudes du stress in situ ou réelle.....	47
1.2.	<i>Impacts du stress.....</i>	48
1.2.1.	Impact du stress aigu : effets sur les performances.....	48
1.2.1.1.	Modèles théoriques, anxiété, stress et les performances.....	48
1.2.1.1.1.	Théories attentionnelles.....	48
1.2.1.1.2.	Effet du stress sur les processus attentionnels : oculométrie.....	51
1.2.1.1.3.	Théories neurophysiologiques.....	52
1.2.1.2.	Effets du stress aigu sur la cognition.....	54
1.2.1.2.1.	Fonctions exécutives supérieures.....	54
1.2.1.2.2.	Impact du stress sur les performances : les modérateurs.....	57
1.2.2.	Impact du stress chronique : effets sur la santé.....	58
1.2.2.1.	Marqueurs du stress chronique.....	59
1.2.2.1.1.	Dérèglement de l'axe HHAC.....	59
1.2.2.1.2.	Modifications des structures cérébrales.....	60
1.2.2.1.2.1.	Modifications hippocampiques.....	60
1.2.2.1.2.2.	Modifications amygdaliennes et orbitofrontales.....	61
1.2.2.1.3.	Stress et développement de troubles cognitifs.....	62
1.2.2.2.	Modérateurs du stress chronique.....	62

1.3.	<i>Techniques de coping</i> .....	63
1.3.1.	Approches centrées sur la résolution du problème .....	64
1.3.2.	Approches centrées sur les émotions .....	64
1.3.2.1.	Techniques de respirations .....	65
1.3.2.1.1.	Interactions entre les fonctions cardiaques et respiratoires .....	66
1.3.2.1.2.	Respiration standardisée lente .....	67
1.3.2.2.	Techniques de rétrocontrôles biologiques .....	69
1.3.2.2.1.	Rétrocontrôles biologiques cardiaques .....	70
1.3.2.2.1.1.	VFC-RETRO, bien-être et santé .....	70
1.3.2.2.1.2.	VFC-RETRO, VFC et performances .....	73
1.3.2.2.1.3.	Impact de la VFC sur la régulation émotionnelle .....	74
1.3.2.3.	Techniques de stimulations cérébrales .....	75
1.3.2.3.1.1.	Cortex préfrontal et fonctions exécutives supérieures .....	76
1.3.2.3.1.2.	Cortex préfrontal et émotions .....	77
1.4.	<i>Modérateurs individuels du stress : traits psychologiques</i> .....	80
1.4.1.	Personnalité, big-five et stress .....	81
1.4.2.	Personnalité et stratégies de coping .....	82
1.5.	<i>Contexte écologique : stress et professionnels de santé</i> .....	84
1.5.1.	Stress chez les professionnels de santé .....	84
1.5.2.	Conséquences du stress chez les professionnels de santé .....	85
1.5.3.	Etudiants en santé .....	86
1.5.4.	Simulation haute-fidélité en santé .....	87
1.5.5.	Simulation haute-fidélité et stress .....	88
1.5.6.	Simulation haute-fidélité et performance .....	88
1.5.7.	Gestion du stress en simulation .....	90
<b>2.</b>	<b>Cadre expérimental</b> .....	<b>91</b>
2.1.	<i>Caractériser les effets du stress aigu sur des tâches cognitivo-motrices</i> .....	91
2.1.1.	Imagerie motrice : définition et moyens de mesures .....	91
2.1.2.	Etude 1 : Impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie motrice explicite et implicite .....	97
2.1.2.1.	Introduction .....	97
2.1.2.2.	Manuscript 1: Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study .....	98
2.1.2.3.	Conclusion .....	107
2.1.3.	Etude 2 : Impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie explicite .....	108
2.1.3.1.	Introduction .....	108
2.1.3.2.	Matériel et Méthodes .....	110
2.1.3.3.	Résultats préliminaires .....	114
2.1.3.4.	Conclusion .....	115
2.2.	<i>Remédiation du stress aigu</i> .....	117
2.2.1.	Etude 3 : Induction et remédiation du stress d'anticipation .....	117
2.2.1.1.	Introduction .....	117
2.2.1.2.	Manuscript 2: Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress .....	119
2.2.1.3.	Conclusion .....	131
2.2.2.	Etude 4 : Remédiation du stress par des techniques de stimulations cérébrales et de rétrocontrôle biologique au laboratoire .....	133
2.2.2.1.	Introduction .....	133
2.2.2.2.	Manuscript 3: Combining Proactive Transcranial Stimulation and Cardiac Biofeedback to Substantially Manage Harmful Stress Effects .....	135
2.2.2.3.	Conclusion .....	156

2.2.3.	Etude 5: Remédiation du stress par des techniques de respiration et de rétrocontrôle biologique dans un contexte écologique.....	158
2.2.3.1.	Introduction.....	158
2.2.3.2.	Manuscript 4 : Effects of relaxing standardized breathing paired with cardiac biofeedback on performance and relaxation during critical simulated situations : A prospective randomized controlled trial .....	159
2.2.3.3.	Conclusion .....	174
2.2.4.	Etude 6 : Impact de la respiration relaxante et du rétrocontrôle visuel sur le stress et les performances techniques en situation écologique .....	177
2.2.4.1.	Introduction.....	177
2.2.4.2.	Matériel et méthode .....	177
2.2.4.3.	Résultats préliminaires .....	179
2.2.4.4.	Conclusion .....	180
2.2.5.	Etude 7 : Etudes des sensibilités individuelles .....	182
2.2.5.1.	Introduction.....	182
2.2.5.2.	Manuscript 5: Influence of personality traits on anticipatory anxiety and preventive interventions to cope with stress.....	184
2.2.5.3.	Conclusion .....	199
<b>3.</b>	<b>Discussion générale .....</b>	<b>202</b>
3.1.	<i>Caractérisation des effets du stress aigu sur les tâches cognitivo-motrices.....</i>	<i>202</i>
3.2.	<i>Techniques de remédiation du stress aigu .....</i>	<i>203</i>
3.2.1.	Techniques de stimulation cérébrale, stress et performances .....	203
3.2.2.	Respiration couplée au VFC-RETRO sur les marqueurs du stress .....	204
3.2.3.	VFC-RETRO couplé à la STCC sur les marqueurs du stress .....	205
3.2.4.	VFC-RETRO sur la cognition.....	206
3.2.5.	VFC-RETRO, HRV et performances : modèles théoriques .....	207
3.2.6.	Personnalité, stress d'anticipation, et efficacité des stratégies de coping .....	209
3.3.	<i>Recommandations pratiques.....</i>	<i>209</i>
3.3.1.	Recommandations pour l'implémentation de l'imagerie motrice.....	210
3.3.2.	Recommandations pour les études sur le stress.....	210
3.3.2.1.	Efficacité et limites des protocoles d'induction du stress .....	210
3.3.2.2.	Caractérisation plus fine des processus émotionnels.....	212
3.3.2.3.	Caractérisation plus fine des processus physiologiques.....	212
3.3.2.4.	Caractérisation plus fine des processus de coping .....	213
3.3.2.5.	Caractérisation plus fine des processus cognitifs .....	214
3.3.3.	Recommandations pour l'implémentation des techniques de coping .....	217
3.3.3.1.	Avantages des interventions courtes .....	217
3.3.3.2.	Définir la durée de pratique des techniques de coping.....	218
3.3.3.3.	Applications du VFC-RETRO.....	220
3.3.3.4.	Applications du VFC-RETRO couplé à la STCC.....	221
3.3.3.5.	Définir le meilleur moment d'implémentation des techniques de coping.....	222
<b>4.</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>224</b>
<b>5.</b>	<b>Perspectives .....</b>	<b>228</b>
5.1.	<i>Étude perspective 1 : gestion du stress durant les examens.....</i>	<i>228</i>
5.1.1.	Stratégies de coping post-événement stressant.....	228
5.1.2.	Pistes pour de nouvelles techniques de coping .....	229
5.1.3.	ECOS, stress, coping et performance .....	229
5.2.	<i>Étude perspective 2 : remédiation du stress chronique.....</i>	<i>232</i>
5.3.	<i>Stress et pandémie de COVID-19.....</i>	<i>234</i>



<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>236</b>
6.1. <i>Définitions du stress et de l'anxiété.....</i>	257
6.1.1. Définitions du stress.....	257
6.1.2. Définitions de l'anxiété .....	258
6.2. <i>Modèle attentionnel (Vine et al. 2016).....</i>	259
6.3. <i>Questionnaire anxiété : STAI-T (Spielberger et al. 1983) .....</i>	260
6.4. <i>Questionnaire activation-désactivation : AD-ACL (Thayer, 1967) .....</i>	262
6.5. <i>Modes psychophysiologiques (McCraty et al. 2009) .....</i>	263
6.6. <i>Définition de l'humeur, des émotions et des affects (Gilet, 2008).....</i>	264
6.7. <i>Modèle d'interaction entre variabilité de la fréquence cardiaque et régulation émotionnelle (Mather et Thayer, 2018) 264</i>	
6.8. <i>Questionnaire peur de l'évaluation négative : PEN (Musa et al. 2004).....</i>	265
6.9. <i>Questionnaire Personnalité : Big-Five (Plaisant et al. 2010).....</i>	266
6.10. <i>Grille d'évaluation technique en simulation haute-fidélité (e.g. choc septique).....</i>	267
6.11. <i>Evaluation non-technique en simulation haute-fidélité : Ottawa (Kim et al. 2006) .....</i>	268
6.12. <i>Questionnaire : Movement Imagery Questionnaire – révisée : MIQR (Williams et al. 2012) .....</i>	269
6.13. <i>Tableaux de résultats, étude 4 .....</i>	270
6.14. <i>Métaphore de la roulette (Sandi, 2013) .....</i>	272

## Listes des abréviations

ACTH : Adrénocorticotrophine

AED : Activité électrodermale

ASR : Arythmie sinusale respiratoire

Bpm : Battements par minute

CLESS : Centre Lyonnais d'enseignement par simulation en santé

CPF : Cortex préfrontal

CPFdl : Cortex préfrontal dorsolatéral

Cpm : Cycle par minute

CRH : Corticotrophine

EVA : Echelle visuelle analogique

HHAC : Hypothalamo-hypophyso adréno-cortical

PEN : Echelle de peur de l'évaluation négative

pNN50 : Pourcentage des RR successifs qui diffère de plus de 50 ms

RG : Récepteurs aux glucocorticoïdes

RETRO : Rétrocontrôle visuel basé sur l'activité cardiaque

RM : Récepteurs aux minéralocorticoïdes

RMSSD : Moyenne quadratique des différences d'intervalles RR

SDNN : Déviation standard des intervalles NN

SHF : Simulation haute-fidélité

SNA : Système nerveux autonome

SNP : Système nerveux parasympathique

SNS : Système nerveux sympathique

SSAM : Système sympathique adréno-médullaire

STAI-E : State Trait Anxiety Inventory Etat

STAI-T : State Trait Anxiety Inventory Trait

STCC : Stimulation transcrânienne à courant continu

TOP : Techniques d'optimisation du potentiel

UCBL1 : Université Claude Bernard Lyon 1

VFC : Variabilité de la fréquence cardiaque

## Liste des figures

Titre des figures	Page
<b>Figure 1</b> : Relations entre stressseurs et réponse de stress	22
<b>Figure 2</b> : Échelles visuelles analogiques (EVA)	26
<b>Figure 3</b> : Structures corticales et sous-corticales impliquées dans les réponses de stress	28
<b>Figure 4</b> : Réaction de sécrétion des hormones de stress à la suite de la perception d'un stressseur	29
<b>Figure 5</b> : Principaux réseaux de connectivité fonctionnelle dans la réponse de stress aigu	30
<b>Figure 6</b> : Réseaux fonctionnels associés au stress	31
<b>Figure 7</b> : Impédance cutanée et réponse de stress aigu	35
<b>Figure 8</b> : Relations entre la perception d'un évènement stressant et modifications cardiovasculaires associées	36
<b>Figure 9</b> : Tracé de variabilité de fréquence cardiaque en fonction du vécu émotionnel de l'individu	37
<b>Figure 10</b> : Méthode d'analyse fréquentielle de la variabilité de la fréquence cardiaque	38
<b>Figure 11</b> : Modification de la sécrétion de cortisol en fonction de la répétition de la confrontation à un même stressseur ( <i>Trier Social Stress Test</i> )	42
<b>Figure 12</b> : Modification de la sécrétion de cortisol en fonction de la répétition de la confrontation à un même stressseur et de l'intensité de la réponse ( <i>Trier Social Stress Test</i> )	42
<b>Figure 13</b> : Relations théoriques entre stress et performances	50
<b>Figure 14</b> : Principes de l'oculométrie	51
<b>Figure 15</b> : Théorie neurophysiologique de l'impact du stress sur les fonctions exécutives	53
<b>Figure 16</b> : Tâches informatisées permettant l'évaluation des fonctions exécutives	55
<b>Figure 17</b> : Effets du stress aigu sur une tâche de mémoire de travail pour différents niveaux de difficultés	58
<b>Figure 18</b> : Effets du stress chronique sur différentes structures corticales et sous-corticales	60
<b>Figure 19</b> : Implémentation de stratégies de gestion du stress en amont et pour les différentes phases d'une réponse de stress	63
<b>Figure 20</b> : Arythmie sinusale respiratoire	66
<b>Figure 21</b> : Impact d'un exercice de respiration lente sur la fréquence cardiaque	67
<b>Figure 22</b> : Schématisation d'une procédure de rétrocontrôle biologique associée à un exercice de respiration	70
<b>Figure 23</b> : Tracé de cohérence cardiaque	70
<b>Figure 24</b> : Relation entre oscillations cardiaques, cérébrales et émotions	74
<b>Figure 25</b> : Stimulation anodale du cortex préfrontal gauche	75
<b>Figure 26</b> : Protocoles expérimentaux existants issus des différentes études s'intéressant aux interactions entre la stimulation transcrânienne à courant continu, le stress, et les capacités cognitives	79
<b>Figure 27</b> : Exemple de patient simulé au Centre Lyonnais d'enseignement par la simulation en santé (CLESS)	87
<b>Figure 28</b> : Données issues d'outils objectifs d'évaluation de l'imagerie motrice	95
<b>Figure 29</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 1	108
<b>Figure 30</b> : Design expérimental de l'étude 2	110
<b>Figure 31</b> : Tâche d'imagerie explicite réalisée : tâche de pointage séquentiel	111
<b>Figure 32</b> : Méthode de détermination du nombre d'erreurs de mouvement oculaire durant la tâche d'imagerie motrice	112
<b>Figure 33</b> : Protocole d'induction du stress <i>versus</i> condition contrôle	113
<b>Figure 34</b> : Evolution des niveaux de stress et de la valence émotionnelle avant et après les 3 tâches d'imagerie motrice explicites de pointage	114
<b>Figure 35</b> : Effet de l'intervention (stress <i>versus</i> contrôle) sur les capacités subjectives, semi-objectives et objectives d'imagerie motrice explicites en fonction du niveau de complexité de la tâche	115
<b>Figure 36</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 2	116
<b>Figure 37</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 3	132
<b>Figure 38</b> : Protocole du manuscrit 3	140

## Liste des figures

<b>Figure 39</b> : Biofeedback intervention: emWavePRO® visual interface	142
<b>Figure 40</b> : Model of electric field induced by left dorsolateral prefrontal cortex anodal stimulation	143
<b>Figure 41</b> : Evolution of heart-rate variability	146
<b>Figure 42</b> : Debriefing judgments	148
<b>Figure 43</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 4	157
<b>Figure 44</b> : Timeline of the experimental design	164
<b>Figure 45</b> : Study flowchart (étude 5)	167
<b>Figure 46</b> : Group performance during high-fidelity simulation	168
<b>Figure 47</b> : Psychological states after the intervention	169
<b>Figure 48</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 5	175
<b>Figure 49</b> : Influence du niveau de stress et du niveau d'activation sur la performance	176
<b>Figure 50</b> : Score de cohérence cardiaque en fonction des interventions	179
<b>Figure 51</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 6	181
<b>Figure 52</b> : Protocol timeline	189
<b>Figure 53</b> : Interventions. Breathing cursor (left part) and cardiac biofeedback visual interface (right part: example of information provided to biofeedback group)	190
<b>Figure 54</b> : Study flowchart	192
<b>Figure 55</b> : Personality traits and anticipatory anxiety	193
<b>Figure 56</b> : Openness trait and cardiac coherence score	194
<b>Figure 57</b> : Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 7	200
<b>Figure 58</b> : Illustration du partage des capacités attentionnelles durant l'imagerie motrice selon la nature de la tâche et en condition de stress	202
<b>Figure 59</b> : Proposition de protocoles expérimentaux permettant de caractériser l'impact de la STCC sur la gestion du stress et la prévention du déclin cognitif observé pendant et après un évènement stressant (e.g. le <i>Trier Social Stress Test (TSST)</i> )	204
<b>Figure 60</b> : Modèle théorique de la relation entre respiration relaxante seule ou couplée au VFC-RETRO et les marqueurs de détente psychophysiologiques, en fonction du temps d'intervention	205
<b>Figure 61</b> : Relation entre VFC-RETRO, respiration relaxante, émotions et fonctions exécutives	208
<b>Figure 62</b> : Modèle multifactoriel de la performance relatif aux caractéristiques du stresser et aux spécificités individuelles	216
<b>Figure 63</b> : Évolution des scores de cohérence cardiaque instantanés durant un stress d'anticipation (terrain : anticipation d'un stress professionnel, laboratoire : anticipation du <i>Trier Social Stress Test</i> )	219
<b>Figure 64</b> : Conseils d'implémentation des techniques de coping à différents temps pour des individus sains et des patients présentant des pathologies associées au stress	223
<b>Figure 65</b> : Effets du stress sur les capacités d'imagerie motrice implicite et explicite	224
<b>Figure 66</b> : Efficacité comparative des interventions sur les marqueurs psychophysiologiques du stress	225
<b>Figure 67</b> : Effets du stress, des techniques de coping, et de la personnalité sur les marqueurs psychophysiologiques et les performances	227
<b>Figure 68</b> : Protocole expérimental du projet ECOSTRESS	231
<b>Figure 69</b> : Protocole expérimental du projet REMEDIATION STRESS CHRONIQUE	233

## Liste des tableaux

Titre des Tableaux	Page
<b>Tableau 1</b> : TIME × GROUP interactions for psychological stress markers. Values are expressed as estimated difference ± standard error (SE)	145
<b>Tableau 2</b> : TIME × GROUP interactions for physiological stress markers. Values are expressed as estimated difference ± standard error (SE)	147
<b>Tableau 3</b> : Performances scores	149
<b>Tableau 4</b> : Characteristics data of residents receiving CONTROL, RELAXING BREATHING (RB), OR RELAXING BREATHING WITH BIOFEEDBACK (RB + BFB) intervention	167
<b>Tableau 5</b> : Interactions GROUPE x TEMPS pour les mesures physiologiques du stress	180
<b>Tableau 6</b> : Adjusted regression models for each personality trait and anticipatory anxiety (STAI-Y and cardiac reactivity) (n=120)	193
<b>Tableau 7</b> : Adjusted regression models for each personality trait and cardiac coherence (n=118)	194

## Liste des Annexes

Titre des Annexes	Page
<b>Annexe 1</b> : Définitions du stress et de l'anxiété	257-258
<b>Annexe 2</b> : Modèle attentionnel (Vine et al. 2016)	259
<b>Annexe 3</b> : Questionnaire anxiété : STAI-T et STAI-E (Spielberger et al. 1983)	260-261
<b>Annexe 4</b> : Questionnaire activation-désactivation : AD-ACL (Thayer, 1967)	262
<b>Annexe 5</b> : Modes psychophysiologiques (McCraty et al. 2009)	263
<b>Annexe 6</b> : Définition de l'humeur, des émotions et des affectes (Gilet, 2008)	264
<b>Annexe 7</b> : Modèle d'interaction entre variabilité de la fréquence cardiaque et régulation émotionnelle (Mather et Thayer, 2018)	264
<b>Annexe 8</b> : Questionnaire peur de l'évaluation négative : PEN (Musa et al. 2004)	265
<b>Annexe 9</b> : Questionnaire Personnalité : Big-Five (Plaisant et al. 2010)	266
<b>Annexe 10</b> : Grille d'évaluation technique en simulation haute-fidélité (e.g. choc septique)	267
<b>Annexe 11</b> : Evaluation non-technique en simulation haute-fidélité : Ottawa (Kim et al. 2006)	268
<b>Annexe 12</b> : Questionnaire : Movement Imagery Questionnaire – Révisée : MIQ-R (Williams et al. 2012)	269
<b>Annexe 13</b> : Tableaux de résultats, étude 4	270-271
<b>Annexe 14</b> : Métaphore de la roulette (Sandi, 2013)	272

## Objectifs généraux

Ce manuscrit est construit de manière à offrir un cadre réflexif et méthodologique dans le domaine du stress. Le thème général de la recherche porte sur l'évaluation d'outils pouvant remédier aux effets délétères du stress et améliorer les performances. Notre travail s'intéresse tout particulièrement à l'évaluation de l'efficacité de deux types d'outils : le rétrocontrôle portant sur des mesures de variabilité de la fréquence cardiaque (stimulation cognitive) et la stimulation transcrânienne du cortex préfrontal dorsolatéral (stimulation cérébrale). Dans notre démarche conceptuelle, nous questionnons les effets de ces techniques dans la régulation des états de stress sur la performance cognitive. Ces effets sont explorés en conditions standardisées de laboratoire et en situations écologiques dans un environnement de simulation de situations d'urgence (médecine de réanimation). Ce travail est mené selon une approche pluridisciplinaire combinant les neurosciences cognitives, la psychologie et la physiologie.

Le manuscrit de thèse se compose d'une partie introductive incluant un état de l'art sur le stress et ses modalités d'induction, ses effets sur la santé et les performances cognitives ainsi que ses modérateurs individuels. La partie expérimentale s'articule en deux chapitres. Le premier cherche à caractériser l'impact du stress aigu sur des tâches cognitivo-motrices (imagerie motrice). Le second explore les effets des techniques de remédiation du stress. Un focus sur la période d'anticipation d'un événement stressant est présenté. Les facteurs de sensibilité individuelle, qui désignent la prédisposition de certains individus à avoir une réponse psychophysiological particulièrement forte en réponse à des stimuli stressants, sont également explorés. Enfin, la discussion générale des résultats arbore une synthèse des études menées et les perspectives d'interprétation qui s'y rapportent. La discussion permet également de proposer des recommandations pratiques à destination des futurs expérimentateurs et praticiens.

# 1. Introduction

Hans Selye, célèbre endocrinologue précurseur des études sur le stress, déclarait après avoir œuvré toute sa vie sur la théorie du stress : « *Everyone knows what stress is but nobody really knows* » (1907-1982). Un quart de siècle plus tard, il est frappant de remarquer que ce constat, malgré des recherches pluridisciplinaires d'envergures, est toujours d'actualité. En effet, même si nous sommes tous capables d'évoquer le souvenir d'une situation stressante, le concept de stress reste mal défini dans la littérature scientifique, probablement en raison de sa nature plurimodale.

## 1.1. Définition du stress

### 1.1.1. Stresseurs et réponse de stress

De nombreuses définitions du stress ont été proposées, sans consensus réel (Annexe 1). Malgré cela, une caractéristique commune émerge : le stress survient communément lorsque les exigences de la situation environnementale dépassent la capacité d'adaptation de l'organisme (Lazarus, 1966). Les exigences environnementales, habituellement qualifiées de stresseurs, sont de nature psychologique (e.g. évaluation sociale) et/ou physiologique (e.g. manque de sommeil). Les réactions individuelles face à l'exposition à ces stresseurs ne sont pas équivalentes, certains individus développant une réponse de stress alors que d'autres, non. Cette diversité va notamment dépendre de la perception du stimulus et de l'évaluation cognitive de la situation (Lazarus et Folkman, 1984). Lorsque les ressources individuelles sont inférieures au niveau d'exigence environnementale, une réponse de stress apparaît, se caractérisant par une différenciation de l'affect couplée à une augmentation du niveau d'activation physiologique. Les réponses de stress sont qualifiées d'aiguës si les modifications psychophysiologiques ne dépassent pas plusieurs dizaines de minutes après la fin du stresseur. Le stress chronique apparaît pour sa part lorsque l'organisme ne peut plus s'adapter, lorsque les réponses de stress aigus sont répétées ou à la suite d'un stresseur trop intense, comme lors de certains syndromes de stress post-traumatique (Fig. 1)<sup>3</sup>. Lorsque le

---

<sup>3</sup> Le stress aigu a été défini comme un stress qui dure de quelques minutes à quelques heures. A l'inverse, le stress chronique est défini comme un stress qui persiste plusieurs heures par jour pendant des semaines ou des mois (Dhabhar, 2010).

stress devient chronique, des modifications perdurent dans l'organisme ; elles sont objectivables par des symptômes biologiques et psychologiques (rapport Inserm, 2011).

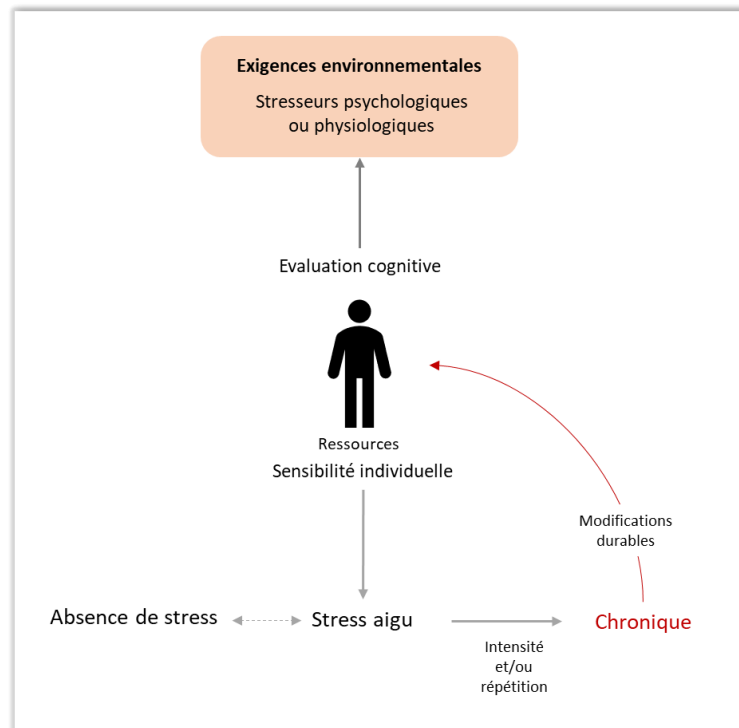


Figure 1. Relations entre stress et réponse de stress. Un individu peut être soumis à différents stressors de nature psychologique et/ou physiologique. En fonction de ses ressources, une réponse de stress peut être engendrée. Si la réponse dure le temps de la confrontation avec le stressor, elle est définie comme aiguë ; à l'inverse, une réponse de stress très intense ou répétée peut s'installer sous une forme chronique. Le développement d'un stress chronique signe alors le passage du « normal » au pathologique.

Traditionnellement, le stress a été défini comme une réponse adaptative, non spécifique, destinée à maintenir le statu quo face à tout défi ou traumatisme (Jackson, 1999; Selye, 1936). Il s'agirait donc d'une réponse conditionnée permettant à l'organisme de s'adapter en cas de danger. En réponse à un événement stressant, une augmentation des sécrétions de catécholamines et glucocorticoïdes est observée. Ces hormones permettent une mobilisation de ressources physiques et attentionnelles pour une action immédiate. L'augmentation du niveau d'activation psychophysologique permet des réactions stéréotypées de confrontation ou de fuite (*fight or flight*). Ces comportements sont adaptés à des situations dangereuses où l'intégrité physique est menacée (i.e. théorie de l'auto-préservation physique). Aujourd'hui, les événements générant du stress sont cependant beaucoup plus variés, et les situations menaçantes pour l'égo vont également induire un niveau de stress élevé. Au besoin de préservation de l'intégrité physique vient donc s'ajouter le besoin d'auto-préservation sociale



(Dickerson et Kemeny, 2004). Ainsi, les stratégies d'adaptation doivent être beaucoup plus complexes et subtiles qu'une simple réponse d'évitement/confrontation.

### 1.1.2. Différences : challenge et menace, stress et anxiété

La phase d'évaluation cognitive est l'élément majeur impliqué dans la diversité des réponses observées face aux stressseurs. Un même évènement ne sera pas catégorisé de la même manière en fonction des individus. Dans leurs travaux pionniers sur le stress, Lazarus et Folkman (1984) ont décrit deux niveaux d'évaluation cognitive qui sont des processus de catégorisation. L'évaluation primaire reflète les perceptions du degré de risque que présente une situation (menace potentielle), alors que l'évaluation secondaire reflète les perceptions des ressources ou des capacités pour faire face à la situation (Lazarus et Folkman, 1984). Ensemble, ces jugements définissent dans quelles mesures les exigences de la situation sont perçues comme étant à la portée - ou non - des capacités d'un individu.

Les évaluations de menace sont caractérisées par une perception du danger qui dépasse celle des ressources. Les personnes se sentant menacées perçoivent une perte potentielle, avec peu ou rien à gagner dans la situation ; les évaluations de menace sont alors plus fortement associées à des réactions émotionnelles négatives. Ces dernières ont été définies par les termes de distress ou de stress négatif. Les évaluations de défi, en revanche, sont celles dans lesquelles la perception du danger ne dépasse pas la perception des capacités à faire face. Elles ont été définies par les notions de challenge, eustress, ou stress positif. Il est cependant très important de souligner que la catégorisation n'est pas souvent chose aisée, du fait que les situations, tout comme les ressources individuelles, peuvent évoluer rapidement. Ainsi, au cours d'un même évènement, le caractère menaçant ou challengeant de la situation va être labile et modulé par les processus de réappréciation (Annexe 2, Vine et al., 2016). L'évaluation cognitive est donc un processus dynamique qui implique des réévaluations primaires et secondaires constantes pouvant modifier le niveau de menace ou de défi ressenti (Lazarus et Folkman, 1984).

La frontière entre stress et anxiété est mince. Les deux sont des réactions émotionnelles, mais le stress est généralement causé par un déclencheur externe (stresseur psychologique ou physiologique). L'anxiété, quant à elle, se définit par un état d'appréhension ou de peur, des inquiétudes persistantes et excessives qui ne disparaissent pas, même en l'absence d'un stresseur. L'anxiété entraîne une série de symptômes semblables à ceux du stress, c'est pourquoi de nombreuses études ont utilisé indifféremment les termes de stress et d'anxiété.

### 1.1.3. Anticipation, stress et récupération

Les réponses de stress aigu surviennent le plus souvent dans des situations nouvelles, menaçantes pour l'ego, incontrôlables et imprévisibles (Dickerson et Kemeny, 2004; Mason, 1968). Notre mode de vie actuel permet d'identifier fréquemment des situations stressantes *a priori* (e.g. réunion, examen important, opération chirurgicale). Ces identifications peuvent par conséquent induire un stress d'anticipation, appelé également anxiété anticipatrice (Hyun et al., 2018)<sup>4</sup>.

Dans ce contexte, la réponse de stress va être constituée de différentes étapes :

- L'identification/annonce de l'évènement à venir
- L'anticipation
- L'évènement stressant
- La récupération

L'annonce ou l'identification d'un futur stressor est généralement brève, de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes. S'en suit une évaluation cognitive durant laquelle l'individu va évaluer la contrôlabilité de l'évènement, c'est-à-dire la possibilité de l'éviter ou de s'y confronter, mais aussi questionner ses ressources (e.g. compétences, émotionnelles). Dans le cas où l'évènement annoncé est évalué comme étant stressant, l'individu entre dans une période d'anticipation. Cette anticipation peut être très courte lorsque l'évènement survient quelques minutes après l'annonce, ou beaucoup plus longue. Nous pouvons anticiper une situation stressante sur plusieurs semaines, voire plusieurs mois (compétition sportive, opération chirurgicale, intervention militaire). Les conséquences et stratégies d'adaptations induites par une anticipation de courte ou de longue durée ne seront pas les mêmes. Il est probable qu'une anticipation s'étalant sur plusieurs mois provoque des modifications psychophysiologiques inadaptées, telles qu'un syndrome d'anxiété généralisée. Malgré l'importance de cette période d'anticipation, il est étonnant de noter que cette période est restée peu explorée jusqu'à ce jour (De Raedt et Hooley, 2016; Juster et al., 2012; Pulooulos et al., 2018). Suite à la période d'anticipation, il y a l'avènement de la situation stressante qui va engendrer - ou non - une réponse de stress, dont l'intensité pourra varier en fonction des

---

<sup>4</sup> Les états d'anxiété sont caractérisés par des sentiments de tension, de nervosité, d'inquiétude, et sont accompagnés d'appréhension. L'anxiété n'est pas forcément induite par un élément stressant spécifique et identifié, c'est un état d'appréhension aspécifique, le stress étant pour sa part lié à un stressor. Dans le cas d'un stress d'anticipation, la situation stressante est anticipée, il y a donc bien la présence d'un stressor. Cependant, les termes d'anxiété et de stress ont été employés de manière indifférenciée par un nombre important d'auteurs. Le terme d'anxiété remplace très souvent celui de stress, notamment dans le cas d'anticipation d'évènements physiques douloureux.

ressources individuelles et de la qualité de la préparation durant la phase d'anticipation. S'en suit une phase de récupération, durant laquelle l'état psychologique et physiologique de l'individu revient à la normale.

#### 1.1.4. Marqueurs et outils de mesure du stress

Le niveau de stress d'un individu peut être estimé à l'aide de paramètres psychologiques et physiologiques. Les paramètres psychologiques sont principalement issus d'une auto-évaluation et reflètent directement le niveau de stress ressenti par le sujet. Les paramètres physiologiques sont relevés au moyen de capteurs qui enregistrent des variations induites par les différents états émotionnels.

##### 1.1.4.1. Outils de mesure du stress aigu psychologique

Il existe un nombre très conséquent de questionnaires permettant d'obtenir des évaluations subjectives du niveau de stress. Ces questionnaires recensent l'occurrence des stressors, des réponses de stress, et permettent l'identification du ressenti immédiat. Ils peuvent être classifiés en trois grandes catégories, évaluant respectivement :

- L'exposition aux stressors (échelles auto-reportées du stress perçu, check-list des événements de vies auto-reportés)
- Les caractéristiques psychologiques stables de sensibilité au stress (anxiété, névrosisme, peur de l'évaluation négative)
- Les ressentis instantanés (échelles de mesures du stress)

La dernière catégorie permet de traduire un état subjectif immédiat par des valeurs quantitatives (e.g. scores sur les échelles). Dans cette partie, nous détaillerons certains de ces outils afin de décrire l'état émotionnel perçu lors de situations stressantes.

##### 1.1.4.1.1. Echelles visuelles analogiques

Les échelles visuelles analogiques (EVA) permettent une approche quantitative simple du niveau de stress perçu. Ces échelles sont le plus souvent proposées sur des lignes horizontales de 100 mm avec des axes unipolaires. Contrairement aux échelles de Likert qui offrent une discrimination segmentée du niveau de stress, les EVA permettent une discrimination plus précise de ses propres ressentis (Fig. 2). Face à une situation stressante, l'estimation des ressources nécessaires (EVA compétences) et des ressources disponibles (EVA ressources) permettent une évaluation qualitative du type de stress, nommée ratio d'évaluation cognitive (Lazarus et Folkman, 1984). Lorsque l'évaluation des ressources disponibles dépasse celle des

ressources nécessaires pour faire face à la situation, l'individu aura tendance à développer une réponse type « eustress », c'est à dire que la situation sera associée à un challenge positif et stimulant. Une EVA confiance en soi permet alors de compléter l'évaluation de la perception de l'événement par rapport aux ressources individuelles internes. La valence émotionnelle du stress permet de déterminer si un individu stressé juge son état comme positif (eustress) ou négatif (distress) (EVA valence).

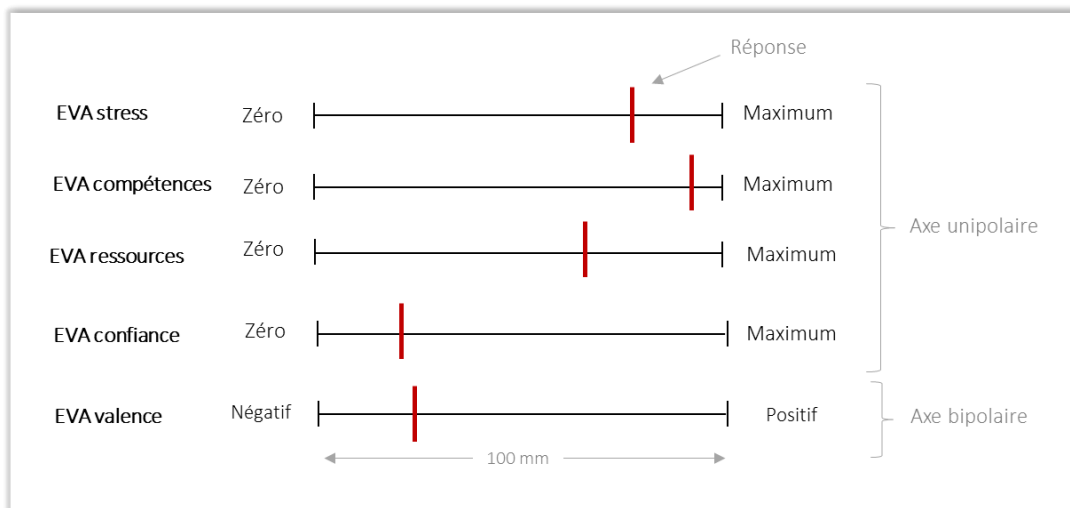


Figure 2. Échelles visuelles analogiques (EVA). Les réponses du ressenti instantané de l'individu sont en rouge. Dans cet exemple, les ressources disponibles estimées (EVA ressources) sont inférieures à celles nécessaires (EVA compétences), une réponse de type « distress » se développe, de nature négative, inhibitrice et menaçante. L'individu a une faible confiance en lui (EVA confiance) et qualifie ce stress de « négatif » (EVA valence).

#### 1.1.4.1.2. Auto-questionnaires

Les échelles visuelles analogiques sont faciles à mettre en place et à analyser. L'EVA stress est très fréquemment utilisée (Ankri et al., 2020; Lesage et al., 2012; Liu et Zhang, 2020; Sigwalt et al., 2020), malgré le fait qu'elle ne repose que sur une seule réponse pour caractériser un état émotionnel complexe et nuancé. Les questionnaires multi-items, bien que par essence plus chronophages, sont des outils intéressants pour évaluer cet état émotionnel complexe. Les axes qu'ils évaluent font souvent l'objet de plusieurs questions. Lorsque plusieurs questions évaluent les mêmes items, certaines sont formulées de manière « inversées », ce qui encourage une lecture appliquée et limite ainsi l'automatisation des réponses.

Le niveau de stress d'un individu peut également être mesuré par l'inventaire d'anxiété trait-état de Spielberger (STAI) (Annexe 3, Arora et al., 2011; Spielberger et al., 1983). Ce questionnaire est composé de deux formulaires évaluant respectivement le trait anxieux (STAI-T), qui reflète les tendances anxieuses de l'individu de manière générale, et l'anxiété

état (STAI-E) qui dépend du ressenti de l'individu au cours de la situation présente. Les scores de chaque formulaire s'échelonnent de 20 (plus bas niveau d'anxiété) à 80 points (plus haut niveau d'anxiété).

L'*Activation-Deactivation Adjective Check List* (AD-ACL) est un test d'auto-évaluation multidimensionnel standardisé construit dans le but d'évaluer rapidement les états d'activation ou d'éveil momentanés (Annexe 4, Boyle et al., 2015; Thayer, 1967). Il s'analyse selon deux dimensions principales : l'axe d'activation/désactivation et l'axe relaxation/tension. Dans un contexte de stress, de gestion du stress, et de leurs impacts sur les performances, il paraît important de caractériser ces états d'activation (Delignières, 1993).

#### *1.1.4.1.3. Avantages et limites des mesures subjectives*

Les avantages des mesures subjectives sont leur rapidité et facilité d'utilisation et d'analyses, ainsi que leurs faibles coûts (Shields et Slavich, 2017). De plus, la grande majorité des EVA et des questionnaires sont traduits dans plusieurs langues et ont fait l'objet de validations rigoureuses (Bruchon-Schweitzer et Paulhan, 1993; Lesage et al., 2009; Thayer, 1989, 1978, 1967). Cependant, ces mesures restent instantanées, n'évaluant de fait le stress qu'à un instant  $t$ . Si l'on souhaite avoir une vision plus globale du ressenti de la personne, ces mesures doivent donc être répétées, ce qui peut devenir relativement chronophage et intrusif lors d'études de terrains.

La principale limite de ces approches est que les perceptions de stress sont entièrement auto-générées, s'exposant ainsi à un manque de lien avec les stressors réels (Shields et Slavich, 2017). Certains traits de personnalité, comme le névrosisme, sont d'ailleurs fortement corrélés avec les scores de stress perçu (Ebstrup et al., 2011), suggérant que les scores rapportés puissent autant refléter des aspects de la personnalité que des niveaux de stress induits par les conditions immédiates.

Enfin, les mesures subjectives ne peuvent s'affranchir complètement d'un biais de désirabilité sociale (ce biais reste cependant non-aléatoire car reflétant une caractéristique de l'individu). Les individus peuvent estimer que leurs réponses pourraient les impacter par la suite, et dès lors préférer ne pas partager la véracité de leur ressenti (exemple de sous-estimation chez des militaires, des pompiers ou un étudiant questionné par un supérieur). Ces biais, appelés aussi effets de demande, peuvent aussi être surestimés, lorsque le participant souhaite satisfaire les attentes de l'expérimentateur (e.g. le participant se doute d'être dans une condition créée pour générer un stress, alors il se note élevé sur l'EVA stress) (Gilet, 2008).

Un couplage des mesures subjectives avec des données physiologiques corrélatives – plus objectives – permet d’obtenir une vision plus globale des réactions psychophysiologiques vécues lors d’un événement stressant. En effet, les données physiologiques restent peu sensibles au contrôle conscient <sup>5</sup>, et permettent donc de s’affranchir des biais de désirabilité des sujets.

#### 1.1.4.2. *Marqueurs et outils de mesure du stress aigu physiologique*

La situation stressante fait automatiquement l’objet d’un traitement cognitif conscient et inconscient. Dès la perception d’un stimulus (e.g. vision d’un jury), un processus de traitement de l’information rapide et intuitif est enclenché, suivi, dans un second temps, d’un traitement plus lent fondé sur un raisonnement (rapport Inserm, 2011). Ces appréciations cognitives peuvent générer des réponses émotionnelles via des connexions étendues entre le cortex préfrontal et le système limbique (Fig. 3).

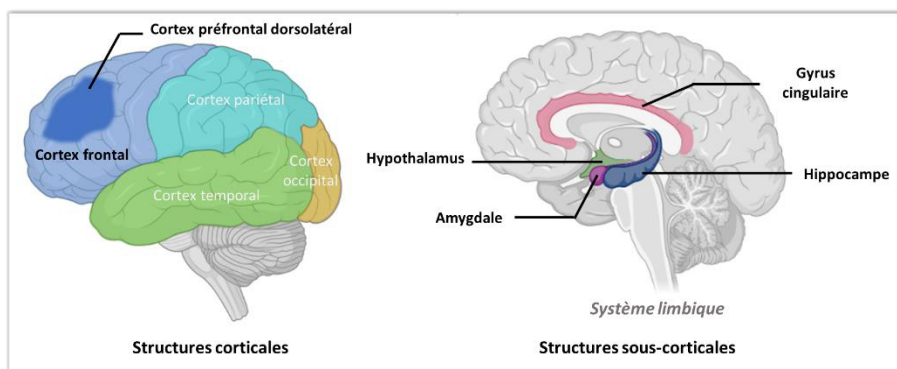


Figure 3. Structures corticales et sous-corticales impliquées dans les réponses de stress.

Les structures limbiques et paralimbiques (hippocampe, amygdale, noyau de la strie terminale) sont reliées à l'hypothalamus et constituent la voie principale d'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso adrénocortical (HHAC) et du système sympathique adrénomédullaire (SSAM). Ces axes jouent un rôle majeur dans la sécrétion en chaîne des hormones de stress (Fig. 4) (Dallman et Hellhammer, 2010). L'activation de l'axe HHAC entraîne une

---

<sup>5</sup> Hormis dans certains contextes très spécifiques d'exercices conscients de respiration ou de rétrocontrôle biologique. Pour plus de détails, voir chapitre suivant : techniques de rétrocontrôles biologiques.

augmentation des glucocorticoïdes circulants, tandis que l'activation du SSAM induit une augmentation des taux de catécholamines.

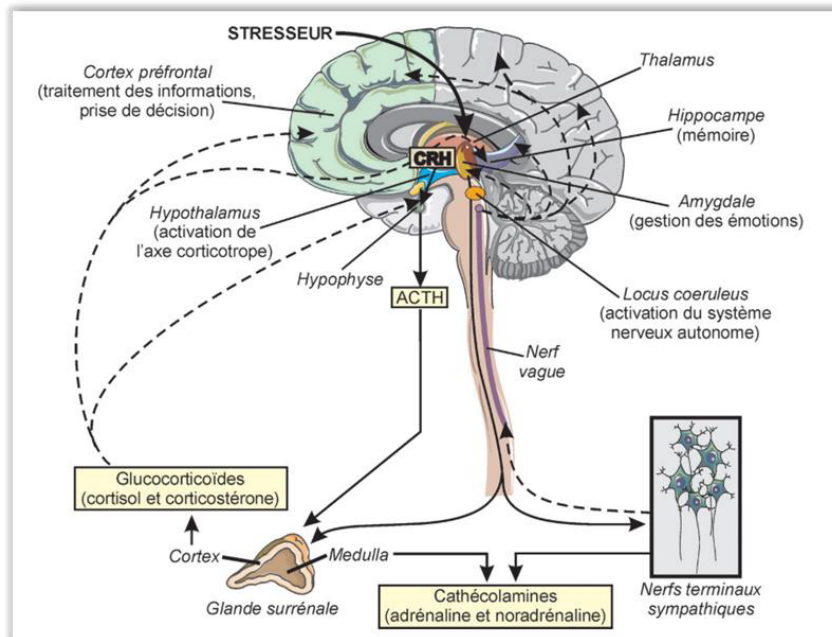


Figure 4. Réaction de sécrétion des hormones de stress à la suite de la perception d'un stressueur. Abréviations : corticotrophine (CRH), adrénocorticotrophine (ACTH). L'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso adrénocortical engendre la sécrétion de CRH par l'hypothalamus, d'ACTH par l'hypophyse antérieure, et enfin de glucocorticoïdes au niveau du cortex de la glande surrénale. L'activation du système sympathique adrénomédullaire entraîne une augmentation de la sécrétion de catécholamines par les nerfs terminaux sympathiques et de la médulla de la glande surrénale. Figure extraite de "Bases neurobiologiques et neuroendocriniennes du stress", rapport Inserm 2011.

#### 1.1.4.2.1. Les niveaux d'activation cérébrale

La perception de stressueurs provoque l'activation de structures corticales et sous-corticales qui engendre des processus cognitifs et affectifs spécifiques. Afin d'appréhender ces niveaux d'activation cérébrale, différentes méthodologies telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et l'étude du signal BOLD (*Blood Oxygenation Level Dependent*) ou encore l'électroencéphalographie, ont été utilisées (Berretz et al., 2021; Gartner et al., 2014; Sängner et al., 2014). Les recherches menées ne s'accordent pas toutes sur les régions cérébrales impliquées dans la réponse de stress, les régions du cerveau ne fonctionnant pas de manière isolée, mais coopérant selon des réseaux fonctionnels dynamiques complexes. Trois réseaux sont particulièrement impliqués dans la réponse de stress aigu chez des individus sains : le réseau de saillance, le réseau de mode à défaut, et le réseau exécutif

central. Ensemble, ils reflètent les processus de régulation autocentrée, émotionnelle, attentionnelle, et cognitive (van Oort et al., 2017) (Fig. 5)<sup>6</sup>.

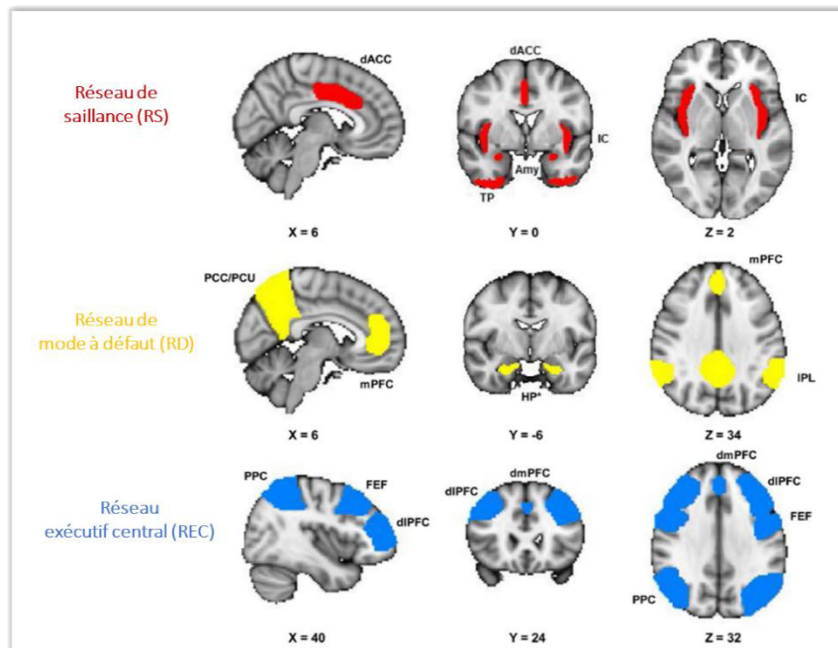


Figure 5. Principaux réseaux de connectivité fonctionnelle dans la réponse de stress aigu. Les régions centrales du réseau de saillance sont le cortex cingulaire antérieur dorsal (ACC dorsal), le cortex insulaire (IC), le lobe temporal (TP) et l'amygdale (Amy). Le réseau du mode à défaut comprend le cortex cingulaire postérieur/précunier (PCC/PCu), le cortex préfrontal médian (mPFC), le gyrus parahippocampique et l'hippocampe (HP) et le lobule pariétal inférieur (IPL). Le réseau exécutif central comprend le cortex pariétal postérieur (PPC), le cortex préfrontal dorsolatéral (dlPFC), et une partie du cortex préfrontal dorsomédial (dmPFC) et des champs occulaires frontaux (FEF). Figure traduite et extraite de "How the brain connects in response to acute stress: A review at the human brain systems level", van Oort et al. (2017).

#### 1.1.4.2.2. Réseaux impliqués dans la réponse de stress aigu

**Le réseau de saillance (RS)** est activé en réponse à divers stimuli et pendant le traitement émotionnel ; il oriente l'attention vers des informations internes ou externes saillantes. En cas de stress aigu, il active un état d'hypervigilance qui favorise la détection des menaces (Fig. 5). Il est composé entre autres de l'amygdale, des lobes temporaux, du striatum ventral, de l'hypothalamus et du thalamus. Des corrélations entre la force de la connectivité au sein du RS, la réponse au cortisol, et l'affect négatif, ont été observées (Hermans et al., 2011). Une situation stressante conduit à prioriser des stimuli saillants et émotionnels dans l'environnement. Cette priorisation est soutenue par une activité accrue du RS et des zones sensorielles ainsi qu'une connectivité augmentée entre ces deux systèmes. Ces changements

<sup>6</sup> Pour plus de détails, voir revue : « How the brain connects in response to acute stress : A review at the human brain systems level », van Oort et al. (2017).



créent un état d'hypervigilance adaptatif qui favorise la survie grâce à une meilleure détection des menaces (van Oort et al., 2017).

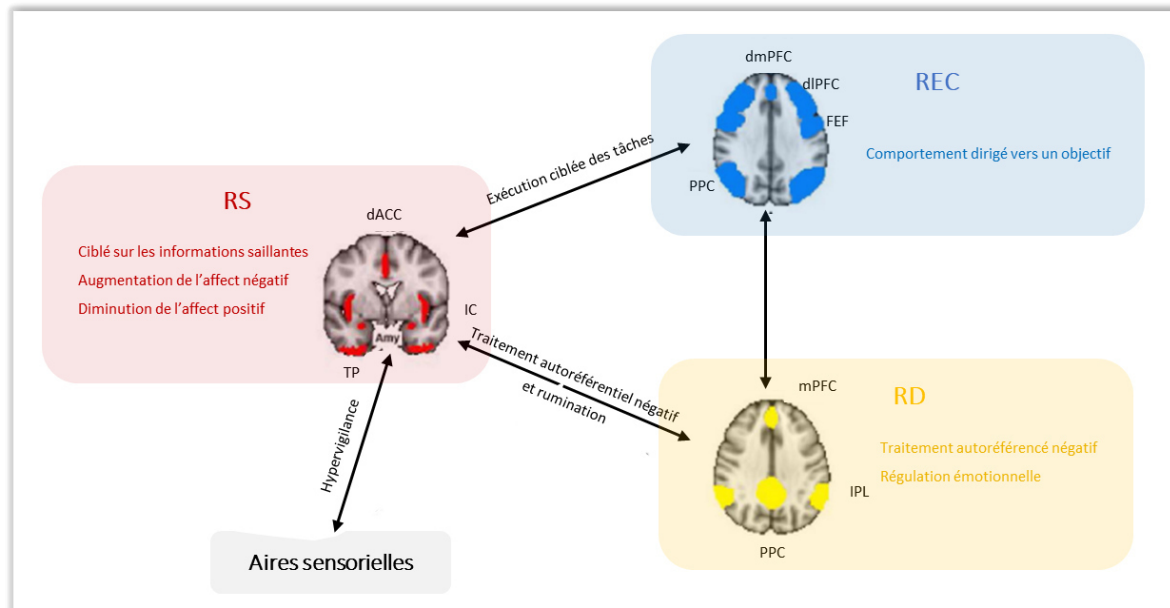


Figure 6. Réseaux fonctionnels associés au stress. La réponse de stress aigu peut être caractérisée en décrivant les changements dynamiques et les interactions entre le réseau de saillance (RS), le réseau du mode à défaut (RD) et le réseau exécutif central (REC). Le RS est automatiquement activé lors d'un évènement stressant. Le RD s'active lorsque le stresser implique un traitement autoréférencé, et le REC est activé lorsque que le stresser est cognitif. Abréviations : Amy : amygdale, dACC : cortex cingulaire antérieur dorsal, dlPFC : cortex préfrontal dorsolatéral, dmPFC : cortex préfrontal dorsomédial, FEF : champs oculaires frontaux, IC : cortex insulaire, IPL : lobule pariétal inférieur, mPFC : cortex préfrontal médian, PCC : cortex cingulaire postérieur, PPC : cortex pariétal postérieur, TP : pôle temporal. Figure adaptée de "How the brain connects in response to acute stress: A review at the human brain systems level", van Oort et al. (2017).

**Le réseau de mode à défaut (RD)** correspond à un état durant lequel un individu ne fait rien de spécifique (e.g., pensée spontanée et auto-générée). Le RD est souvent distingué en une partie antérieure jouant un rôle dans le traitement auto-référentiel et la régulation des émotions, et une partie postérieure qui serait associée au traitement mnésique. Toutes les études ne s'accordent pas sur la composition exacte du RD, les différences étant probablement liées à la variété des pensées et processus cognitifs qui s'y déroulent à un instant donné. Ainsi l'inclusion de l'hippocampe et du parahippocampe, est très probablement liée à l'activation de la mémoire épisodique pendant le repos. Ce réseau semble être activé lorsque le traitement autoréférencé est un élément central du protocole d'induction du stress (van Oort et al., 2017) (Fig. 6). Dans un cadre expérimental, les traitements autoréférencés s'opèrent lorsqu'un participant crée des imageries mentales stressantes, ou lorsqu'il subit des retours négatifs sur sa performance <sup>7</sup>. L'induction d'un stress entraîne une activation généralisée dans le RD.

<sup>7</sup> Afin d'induire une réponse, certains protocoles demandent aux participants de s'imaginer dans des situations stressantes via des souvenirs ou de s'identifier à des images négatives. Pour plus de détails, voir chapitre : Induction du stress par des stressers psychologiques.

**Le réseau exécutif central (REC)** est actif pendant la réalisation de comportements dirigés vers un objectif et, de fait, est impliqué dans un large éventail de fonctions cognitives telles que l'attention, le maintien actif et le traitement des informations, ou encore la prise de décisions (Fig. 6). Il est composé du cortex préfrontal dorsolatéral, du cortex pariétal postérieur, et d'une partie du cortex préfrontal dorsomédial. La plupart des protocoles d'induction de stress n'induisent pas de changements dans le REC. Cependant, certaines études ont observé une augmentation de l'activité du REC lors de la confrontation avec un stressor contenant des éléments des fonctions exécutives supérieures (van Oort et al., 2017). Dans un cadre expérimental, un nombre important de stressors reposent sur des composantes cognitives (e.g. tâche de Stroop, calcul mental)<sup>8</sup>.

#### *1.1.4.2.3. Réponse cérébrale de stress aigu*

##### *1.1.4.2.3.1. Récepteurs aux glucocorticoïdes*

Les études sur l'animal et l'humain ont montré la présence de deux types de récepteurs corticaux et sous-corticaux aux glucocorticoïdes, qui contribueraient au bon fonctionnement neuronal et à la régulation de l'axe HHAC. Lorsque le cortisol se lie aux récepteurs cellulaires, le complexe hormone-récepteur est transporté vers le noyau pour se fixer sous forme de dimères au sein de l'ADN, affectant ainsi les taux de transcriptions des gènes. Les récepteurs activés peuvent bloquer ou stimuler l'activité d'autres facteurs de transcription par des interactions protéines. De nombreux travaux ont permis d'identifier ces voies de signalisation ainsi que les différents modes d'action du cortisol (De Kloet et al., 2018; Heegde et al., 2015; McEwen et al., 2016; Vogel et al., 2016). Nous présentons une synthèse de ces connaissances bien qu'elles ne fassent pas l'objet d'une exploration expérimentale au sein de cette thèse.

Les deux types de récepteurs aux glucocorticoïdes cérébraux se différencient par leur niveau d'affinité au cortisol et leur localisation (Sousa et al., 2008). Les récepteurs aux minéralocorticoïdes (RM), appelés aussi type 1, se lient au cortisol avec une haute affinité. Les RM sont largement exprimés dans les neurones limbiques et plus particulièrement dans l'hippocampe, le septum latéral et l'amygdale. Ces récepteurs à haute affinité sont activés pour de faibles concentrations de cortisol. Lors d'un pic circadien de sécrétion, et/ou lors d'un stress aigu, ces récepteurs deviennent saturés (De Kloet et al., 2018). Les récepteurs aux glucocorticoïdes (RG), appelés de type 2, se lient au cortisol avec une affinité basse et sont

---

<sup>8</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : Induction du stress par des tâches cognitives.

représentés de façon relativement ubiquitaire dans le cerveau. Ils deviennent graduellement occupés lorsque les concentrations en cortisol augmentent. La fixation du cortisol au niveau de l'hypophyse et de l'hypothalamus est impliquée dans les boucles de rétroactions négatives qui régulent l'axe HHAC, afin de maintenir l'homéostasie (De Kloet et al., 2018). Les interactions cortisol-récepteurs cérébraux sont particulièrement importantes pour expliquer les effets neurophysiologiques du stress sur les capacités cognitives<sup>9</sup>.

#### *1.1.4.2.3.2. Stress, structures corticales et sous-corticales*

Le cortex préfrontal (CPF), l'hippocampe et l'amygdale sont des structures clés qui interagissent de façon dynamique dans la perception d'événements stressants et la réponse de stress (Arnsten, 2015; Contrada et Baum, 2010; Pruessner et al., 2009, 2008). Plusieurs études ont montré que l'activité neuronale dans le CPF est largement modifiée lors des réponses de stress (Arnsten, 2009; Arnsten et al., 2015). Lors de conditions normales ou en situation de contrôle, le CPF supprime les réponses de stress, alors que lors de situations stressantes, une réduction de l'activité du CPF est observée (Arnsten, 2009; Arnsten et al., 2015). Le réseau CPF dorsolatéral-amygdale est fortement associé aux réponses de stress. Quaedflieg et al. (2015) ont montré que la connectivité fonctionnelle de ce réseau est négativement associée aux réponses de stress. Une activité accrue au sein de l'amygdale stimule l'axe HHAC et entraîne une augmentation des niveaux de cortisol (Arnsten, 2015; Dedovic et al., 2009). Lors de la confrontation avec une situation stressante, l'hippocampe aurait pour fonction d'évaluer l'intensité du stress (Dedovic et al., 2009). En effet, durant un stress psychosocial, une diminution du niveau d'activation de l'hippocampe est observée, cette désactivation étant elle aussi positivement corrélée avec la sécrétion de cortisol (Dedovic et al., 2009).

#### *1.1.4.2.4. Réponses du système nerveux autonome*

La réponse de stress aigu implique une activation rapide du SSAM suivie d'une activation plus durable de l'axe HHAC (Contrada et Baum, 2010; Dallman et Hellhammer, 2010). Ces activations vont engendrer une série de modifications de l'état physiologique décrit ci-dessous.

---

<sup>9</sup> Les implications de ces deux types de récepteurs dans les interactions entre stress et cognition ont également été largement décrites (Lupien et al., 2007b; Vogel et al., 2016). Pour plus de détails, voir chapitre : Impact du stress aigu : effets sur les performances.

#### *1.1.4.2.4.1. Activation du système sympathique adréno-médullaire (SSAM)*

Lors d'un événement stressant, on observe une activation rapide du système nerveux sympathique, qui engendre la libération des catécholamines (adrénaline et noradrénaline) par les nerfs terminaux sympathiques et par la médulla des glandes surrénales. L'augmentation des concentrations de catécholamines va accélérer la fréquence cardiaque, augmenter la pression artérielle, dilater les bronchioles, favoriser la libération de glucose dans le sang et augmenter le taux métabolique (Burg et Pickering, 2010; Lundberg, 2010). A l'échelle de l'organisme, ces modifications permettent des réponses comportementales rapides de combat ou de fuite, face à des situations urgentes.

#### *1.1.4.2.4.1.1. Conductance cutanée, diamètre de la pupille, alpha-amylase*

L'impédancemétrie cutanée, les mesures de dilatation de la pupille et les concentrations en alpha-amylase permettent d'estimer le niveau d'activation du système nerveux sympathique. Ces marqueurs, très réactifs, sont détectables dans les secondes qui suivent la perception du stress. L'activité électrodermale est conséquente à l'activité des glandes sudoripares situées sur les surfaces palmaires manuelles et podales. Elle a été largement utilisée pour estimer les niveaux de stress (Claverie et al., 2020; Liu et Zhang, 2020; Liu et Du, 2018; Reinhardt et al., 2012). Les variations de l'activité électrodermale résultent des modifications des niveaux d'activité du système sympathique (Posada-Quintero et Chon, 2020); et en cas de pic d'activité de ce système, les glandes sudoripares augmentent leur sécrétion, élevant ainsi la conductance cutanée. Le signal contient des informations dans les changements lents (composante tonique) et rapides (activité phasique) (Fig. 7). Lors d'un événement stressant, les deux composantes du signal augmentent (Claverie et al., 2020; Liu et Zhang, 2020; Liu et Du, 2018; Reinhardt et al., 2012).

Les changements de diamètre de la pupille permettent également d'estimer indirectement le niveau d'activité du système noradrénergique; la dilatation des pupilles correspondant à une activation de ce système. La pupillométrie est une technique de mesure du stress non invasive et rapide (de Berker et al., 2016), qui nécessite toutefois des conditions lumineuses standardisées et une immobilisation de l'individu. Ces conditions peuvent être difficiles à obtenir lorsque le stress est étudié en milieu écologique. Une autre manière d'estimer l'activité noradrénergique est de mesurer les taux sanguins de catécholamines qui augmentent dès les premières minutes suivant l'exposition au stress (Lundberg, 2010). Une activation du système nerveux autonome, via les innervations des glandes salivaires,

engendre la sécrétion de l'enzyme alpha-amylase. Il a été suggéré que les changements en alpha-amylase reflètent les changements en catécholamines, dû à l'augmentation de l'activité du SSAM.. Ainsi, certains auteurs ont utilisé des mesures de l'alpha-amylase salivaire comme indicateur de l'activité noradrénergique (Klopp et al., 2012; Vacher et al., 2019; Valentin et al., 2015). Cependant, même si on observe une augmentation de l'alpha-amylase salivaire dès les premières minutes qui suivent le début du stress, l'augmentation n'est pas toujours corrélée avec celle des catécholamines, complexifiant ainsi l'interprétation de ces données (Nater et al., 2006).

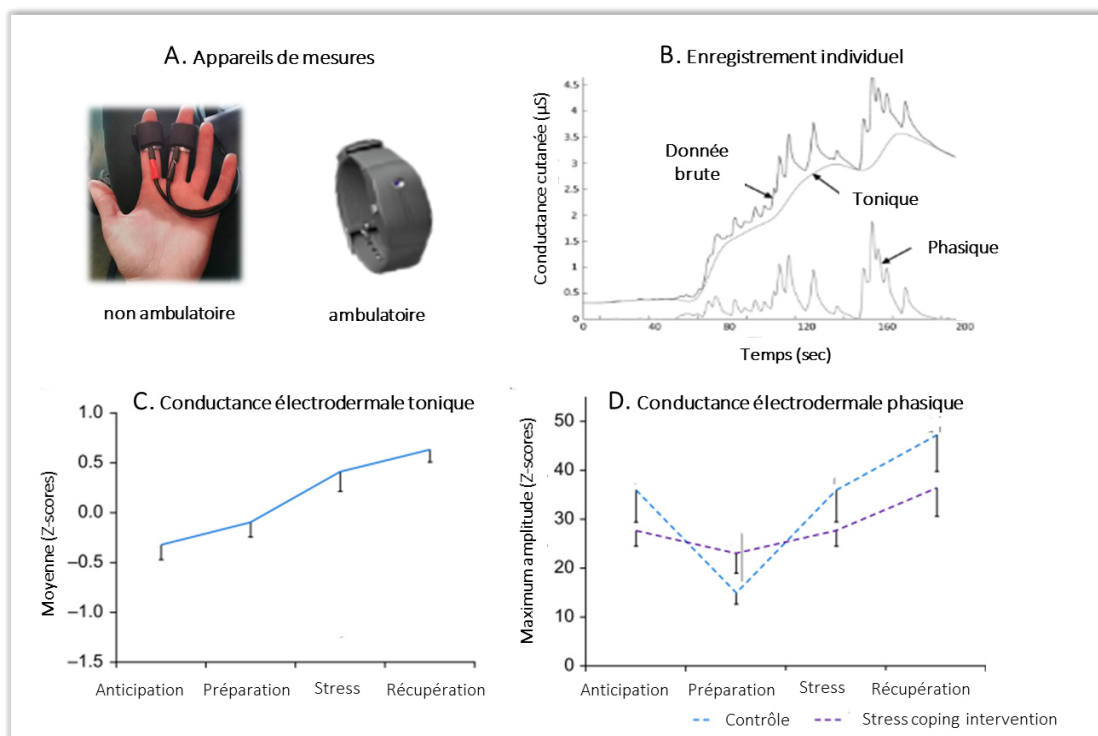


Figure 7. Impédance cutanée et réponse de stress aigu. (A) Appareils de mesure de l'activité électrodermale. (B) Exemple d'un enregistrement de conductance cutanée. Le signal brut peut être décomposé en une composante tonique (changement lent) et une composante phasique (changement rapide). Figure extraite et traduite de : "Innovations in Electrodermal Activity Data Collection and signal Processing : A systematic Review" Posada-Quintero et Chon (2020). (C) Évolution de l'activité électrodermale tonique au cours de différente phase d'une réponse de stress. (D) Activité phasique au cours de différentes phases d'une réponse de stress et en fonction de la mise en place d'une stratégie de coping (violet) ou non (bleu). Dans ce cas précis, on observe une diminution de la conductance pendant la période de préparation qui précède l'évènement stressant. Figures extraites et adaptées de "Impact of stress management strategies and experience on electrodermal activity during high-fidelity simulation of critical situations", Claverie et al. (2020).

#### 1.1.4.2.4.1.2. Paramètres cardiovasculaires

Les paramètres cardiovasculaires sont des mesures essentielles pour la caractérisation des réponses de stress. La fréquence cardiaque est régulée par le réseau autonome central qui est composé de structures corticales et limbiques (Fig. 8, partie 1). Ce réseau reçoit des afférences viscérales composées d'informations physiologiques internes ainsi que des afférences provenant de l'environnement externe. Les efférences du réseau autonome central

sont transmises au nœud sinusal et auriculoventriculaire par les voies sympathique et parasympathique qui exercent respectivement des fonctions régulatrices excitatrice et inhibitrice (Fig. 8, partie 2) (Marieb et Hoehn, 2016a). Lors d'un événement stressant, la fréquence cardiaque accélère, en raison de la stimulation du système nerveux sympathique (SNS) et de l'inhibition du système nerveux parasympathique (SNP). Parallèlement, le débit sanguin et la pression artérielle augmentent, et la variabilité de la fréquence cardiaque diminue (Fig. 8, partie 3).

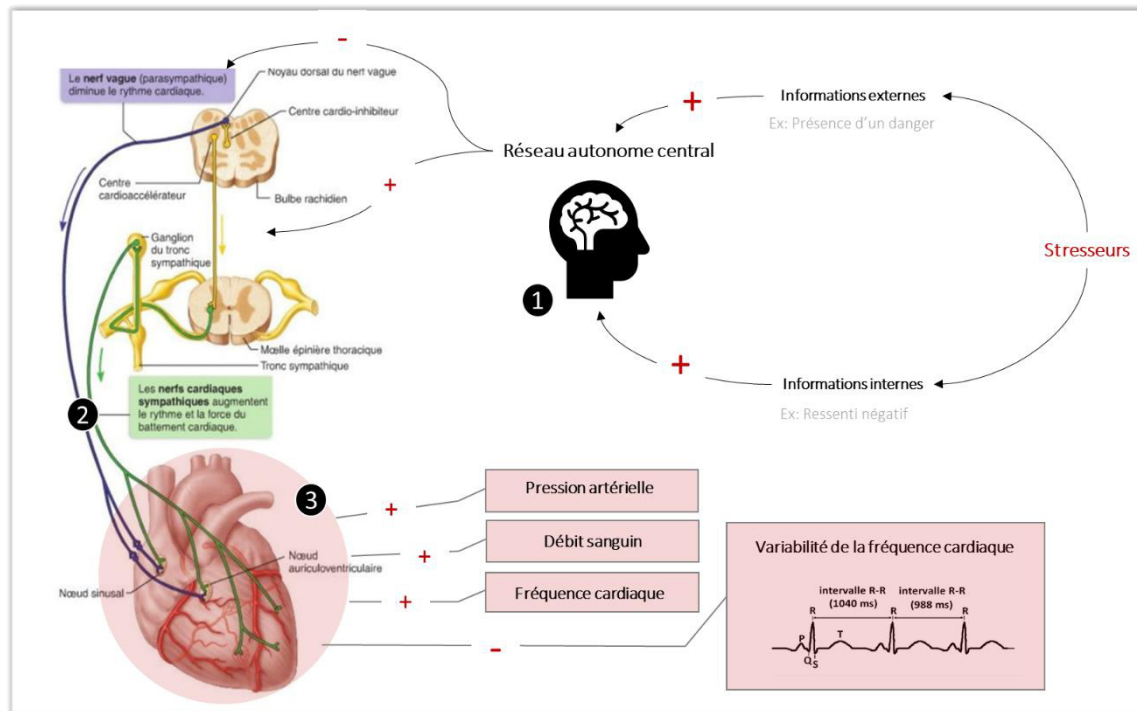


Figure 8. Relations entre la perception d'un événement stressant et modifications cardiovasculaires associées. Partie gauche de la figure extraite de "The Cardiovascular System the Heart : Autonomic Innervation of the Heart" Marieb et Hoehn, p 702 (2016). (1) La présence de stressseurs est détectée par le réseau autonome central. (2) Des messages sont envoyés par les branches du système nerveux autonome : stimulation du système sympathique et retrait du parasympathique. (3) Ces messages nerveux engendrent des modifications sur les différents paramètres cardiovasculaires.

**Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC).** Le cœur ne bat pas à une vitesse constante, il accélère et décélère continuellement, sous le contrôle permanent des innervations sympathique et parasympathique. Ainsi, la VFC représente la fluctuation temporelle entre deux intervalles de battements cardiaques adjacents, permettant de caractériser l'évolution instantanée de la fréquence cardiaque (Shaffer et al., 2014). La VFC est générée via des processus dynamiques et non linéaires du système nerveux autonome (Shaffer et Ginsberg, 2017). Ces systèmes non linéaires sont flexibles et permettent une adaptation rapide à un environnement changeant et incertain. En effet, une VFC haute montre de bonnes capacités d'adaptation et est associée à de nombreux marqueurs de santé et de performance dans la littérature (Colzato et al., 2018; Kemp et Quintana, 2013; Thayer et al., 2012).

Étant donné que la VFC est générée par des interactions cerveau-cœur, elle est considérée comme un indicateur de la fonction neurocardiaque. Les émotions telles que la peur, la joie ou la colère se reflètent dans les variations de la fréquence cardiaque (Fig. 9) (McCraty et al., 2009b). Dans les états d'activation importante comme lors d'une situation stressante, le système sympathique domine, la VFC se désynchronise et devient irrégulière. Au contraire, lors d'une émotion positive, les deux systèmes sont en équilibre et la VFC a tendance à se synchroniser. Certains auteurs ont associé des patterns de tracés d'évolution cardiaque avec des ressentis divers. McCraty et collaborateur (2009) ont ainsi défini 6 modes définissant la relation attendue entre différentes catégories d'expériences émotionnelles subjectives (colère, frustration, tristesse, sérénité, amour, excitation) et leur activité physiologique associée (Annexe 5).

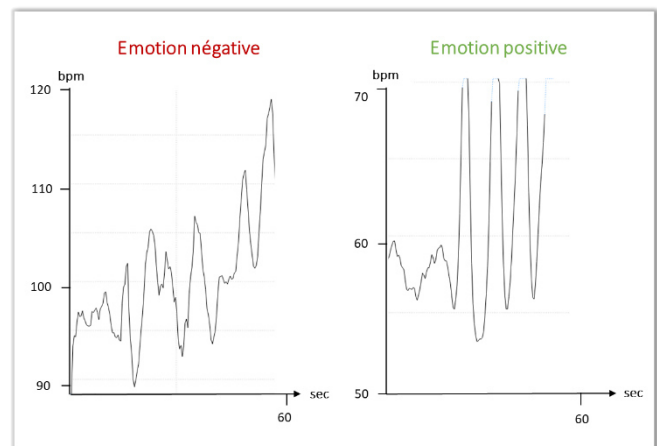


Figure 9. Tracé de la variabilité de la fréquence cardiaque en fonction d'un vécu émotionnel de l'individu. (Données personnelles).

**Méthodes d'analyses de la VFC.** La variabilité de la fréquence cardiaque peut être étudiée dans les domaines temporel et fréquentiel, à l'aide de décompositions spectrales (Saboul, 2013; Shaffer et Ginsberg, 2017)<sup>10</sup>. La méthode d'analyse temporelle permet d'obtenir des informations sur les variations courtes et longues. Les différents marqueurs temporels sont basés sur l'analyse des intervalles RR (entre deux battements cardiaques) et NN (qui sont les mêmes intervalles sans la prise en compte des artéfacts). La déviation standard des intervalles NN (SDNN, ms) est modulée par l'activité du système nerveux sympathique et du système nerveux parasympathique. Dans les enregistrements courts et au repos, la principale source de variation de la SDNN provient de la régulation parasympathique engendrée par l'arythmie sinusale respiratoire<sup>11</sup>, en particulier avec des protocoles de respiration lente et standardisée. La moyenne quadratique des différences d'intervalles RR (RMSSD, ms) estime les changements à médiation vagale. Enfin, le pourcentage des RR successifs qui diffère de plus de 50 ms (pNN50) est étroitement corrélé à l'activité du système nerveux parasympathique

<sup>10</sup> Pour une excellente revue sur la variabilité de la fréquence cardiaque, voir « *An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms* » Shaffer et Ginsberg (2017)

<sup>11</sup> Pour plus de détail voir chapitre suivant : Techniques de gestion émotionnelles, les techniques de respirations

(Shaffer et Ginsberg, 2017). L'approche fréquentielle permet d'obtenir des informations sur les parts respectives d'activations des deux branches du système nerveux sur le contrôle cardiaque (Fig. 10). La bande des basses fréquences (0,04-0,15 Hertz) est composée de rythmes dont les périodes sont comprises entre 7 et 25 secondes et est modulée par les fréquences respiratoires lentes comprises entre 3 et 9 cycles par minute (cpm). Les basses fréquences reflètent les modulations sympathiques. La bande des hautes fréquences (0,15-0,40 Hertz), appelée aussi bande respiratoire, est modulée par la respiration de 9 à 24 cpm, les hautes fréquences reflétant le contrôle du système nerveux parasympathique. Le rapport entre la puissance LF et HF (rapport LF/HF) permet d'estimer le rapport entre l'activité du système nerveux sympathique et celle du système nerveux parasympathique. Ainsi, les mesures de la HRV nous permettent d'extrapoler sur le niveau d'activation physiologique activé à un temps  $t$ , et d'attester si le système est plutôt dominé par le système nerveux sympathique (e.g. réponse de stress) ou parasympathique (e.g. état relâché).

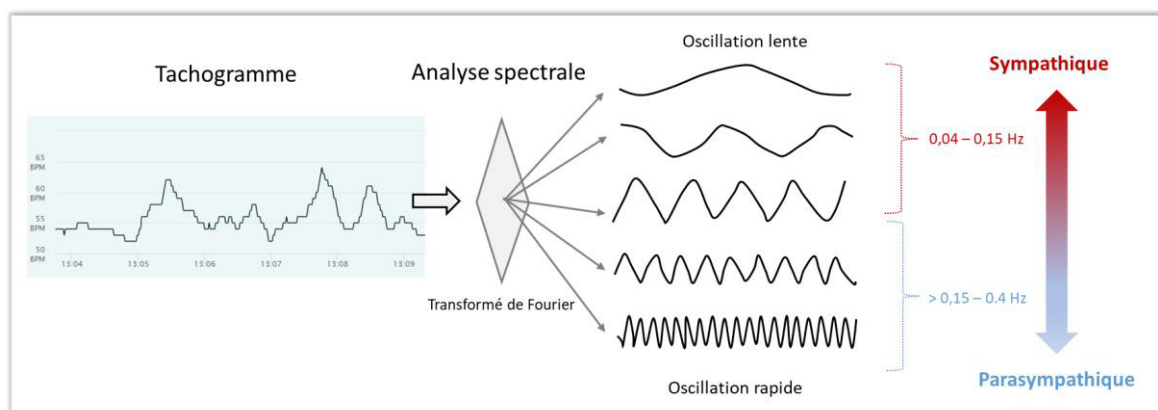


Figure 10. Méthode d'analyse fréquentielle de la variabilité de la fréquence cardiaque. En bleu on retrouve les basses fréquences, et en rouge les hautes fréquences. Lorsqu'un individu respire à une fréquence normale (12 cycles par minutes), ces oscillations reflètent la dominance du mode de contrôle cardiaque (parasympathique ou sympathique).

#### 1.1.4.2.4.2. *Activation de l'axe hypothalamo-hypophyso adrénocortical (HHAC)*

Lors d'une réponse de stress, suite à l'activation rapide de l'axe SSAM, on observe dans un second temps une activation plus lente de l'axe HHAC. L'activation de l'axe HHAC entraîne la sécrétion de corticotrophine (CRH) par l'hypothalamus, puis d'adrénocorticotrophine (ACTH) par l'hypophyse antérieure, et enfin des glucocorticoïdes par le cortex de la glande surrénale (Dallman et Hellhammer, 2010). L'évolution des taux de cortisol salivaire permet une caractérisation de la réponse de l'axe HHAC lors d'un événement stressant. Les glucocorticoïdes augmentent la rétention hydrosodée, le volume et la pression sanguine, stimulent la néoglucogénèse et les mobilisations lipidiques et protéiques. En parallèle, ces



hormones vont abaisser le seuil de sensibilité à l'insuline et inhiber la réponse immunitaire et inflammatoire. Cette réponse en chaîne est plus lente que celle du SSAM, ainsi les marqueurs hormonaux seront observés plus tardivement après le début de l'évènement stressant (Burg et Pickering, 2010). Des dosages salivaires de cortisol peuvent être effectués par prélèvement, le sujet devant mastiquer un pellet de coton durant deux minutes. La salive est ensuite récoltée par centrifugation, et la concentration en cortisol détectée par dosage enzymatique. Le pic de cortisol s'opérant en moyenne à 20 et 40 minutes après le stresser ; les concentrations du cortisol récolté à un instant  $t$  reflètent l'intensité du stress perçu 15-20 minutes en amont (Gerrin, 2010; Lundberg, 2010). La durée et l'intensité du stresser sont les principaux facteurs modérateurs de la sécrétion du cortisol (Dickerson et Kemeny, 2004).

Les réponses de l'axe HHAC dépendent également du type de stresser <sup>12</sup>. Une méta-analyse regroupant plus de 200 études portant sur le stress induit en laboratoire a mis en évidence que tous les stressers n'ont pas le même potentiel d'activation (Dickerson et Kemeny, 2004). Dickerson et Kemeny ont défini trois principales caractéristiques du stresser influençant la sécrétion de cortisol : *i*) le stresser doit contenir une tâche où l'individu doit performer (ex : tâche cognitive), *ii*) le résultat de la tâche doit être incontrôlable/peu contrôlable, et *iii*) la tâche doit faire l'objet d'une évaluation sociale. Ainsi, une induction de stress par la combinaison d'un oral en public avec une tâche cognitive, comme le *Trier Social Stress Test* (Kirschbaum et al., 1993), déclenche une grande réactivité de l'axe HHAC. Les caractéristiques du stresser affectent à la fois l'intensité de la réponse de stress ainsi que la récupération. Ensemble, ces résultats réfutent l'idée que tous les stressers psychologiques provoquent des réponses de sécrétions en cortisol et remettent en cause les définitions non spécifiques du stress (Selye, 1936).

#### 1.1.4.2.5. Modérateurs de l'axe HHAC

L'âge, le sexe, ou encore la prise de contraceptifs hormonaux sont des facteurs susceptibles de moduler significativement les réponses de l'axe HHAC (CESH, 2007). Afin d'étudier spécifiquement les réponses de stress, il est donc primordial que les protocoles expérimentaux prennent en compte ces variables (e.g. critères d'inclusion/exclusion, consignes spécifiques, ajustement de modèles statistiques). Les réponses de l'axe HHAC suivent un rythme circadien prononcé, avec des niveaux de cortisol élevés aux premières

---

<sup>12</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : Induction du stress : les stressers psychologiques.

heures du matin et qui diminuent progressivement et continuellement au cours de la journée (Dickerson et Kemeny, 2004; Kudielka et al., 2004b). Par conséquent, si un stimulus stressant est appliqué le matin, les niveaux de cortisol pré-stress sont généralement plus élevés comparativement aux niveaux pré-stress mesurés lors d'une session se déroulant l'après-midi ou le soir. Ainsi, en réponse à un stressor, les deltas de sécrétions de cortisol seront plus importants durant les après-midis que les matins, c'est pourquoi un grand nombre d'études de laboratoire contrôlent les heures de passations et sont régulièrement réalisées durant les après-midis (Bibbey et al., 2013; Dickerson et Kemeny, 2004; Schwabe et al., 2009, 2007).

Il a également été avancé que l'âge, le sexe, la phase du cycle menstruel et l'utilisation de contraceptifs hormonaux impacteraient les réponses de l'axe HHAC (Kudielka et al., 2004a). Par exemple, les jeunes adultes (23 ans) semblent avoir des sécrétions d'ACTH plus élevées que des adultes plus âgés (Kudielka et al., 2004a). Cependant, une méta-analyse n'a pas montré d'effet âge expliquant la variabilité dans les réponses de sécrétion en cortisol (Dickerson et Kemeny, 2004). Kirschbaum et collaborateurs (1999) ont montré que les hommes semblaient avoir une réponse hypothalamique (sécrétion de cortisol) plus forte que les femmes en réponse à une stimulation stressante. Ils ont postulé que ces différences seraient partiellement dues aux interactions entre la corticolibérine et l'estrogène. Il convient tout de même de souligner que, là encore, les différences de sexe n'ont pas été détectées par une méta-analyse réunissant plus de 200 études de laboratoires (Dickerson et Kemeny, 2004). Des études plus récentes semblent montrer que l'effet sexe pourrait être porté plutôt par des effets du genre lié au rôles sociaux plutôt qu'aux différences biologiques, offrant ainsi une piste d'explication pour les différences précédemment observées (Lupien et al., 2018).

Les expériences individuelles, comme par exemple une rencontre initiale avec une situation stressante similaire, vont impacter les évaluations cognitives ultérieures. Ces expériences vont en effet engendrer des modifications dans les processus d'évaluation primaire et secondaire. Dans leur modèle, Vine et collaborateurs (*Integrative framework of stress*, 2016) proposent qu'une expérience préalable augmentera ou diminuera la perception des ressources disponibles. Une bonne performance permettrait aux individus d'estimer leurs ressources nécessaires pour contrôler la future situation comme plus élevées (expérience = nouvelle ressource). A l'inverse, un échec alourdirait la perception des besoins nécessaires et induirait une charge supplémentaire (Vine et al., 2016). Contrairement à cette théorie, nous ne supposons pas qu'une expérience négative mène systématiquement à une charge

supplémentaire. Puisque les processus d'évaluation sont constants, nous posons l'hypothèse que les individus ré-évaluent à posteriori la situation déjà vécue. Une expérience, même d'issue négative sur le plan émotionnel et/ou de la performance, peut être ainsi perçue à posteriori comme une force <sup>13</sup>. L'individu est alors en mesure d'identifier les causes de son échec et de mettre en place de nouvelles stratégies d'adaptation préventives.

Les effets de l'expérience sur la réponse de stress sont connus depuis longtemps. Kirschbaum et collaborateurs (1995), ont montré que la répétition d'un même stressor sur deux jours d'écart provoquait une diminution de la réactivité de l'axe HHAC, mis en avant par une diminution des niveaux de cortisol le second jour (Fig. 11) (Kirschbaum et al., 1995). Même si quelques études se sont penchées sur les questions de réactivité face à des situations stressantes répétées en faisant légèrement varier le stressor (anticipation d'un discours dont le contenu diffère) ou en utilisant strictement le même (Kirschbaum et al., 1995; Lü et al., 2016; O'Súilleabháin et al., 2019), la grande majorité des protocoles de recherche en laboratoire ont comparé un groupe stress avec un groupe contrôle afin d'éviter les effets de l'expérience. Notons également que certains auteurs déterminent l'intensité de la réponse de stress selon les niveaux de sécrétion de cortisol (Fig. 12). De nombreuses études catégorisent donc les participants en haut répondeurs (augmentation importante de cortisol) ou en non répondeurs (pas ou très peu d'augmentation), a posteriori (Kirschbaum et al., 1995; Pruessner et al., 2008; Quaedflieg et al., 2015).

---

<sup>13</sup> "What doesn't kill me, makes me stronger", Nietzsche (2001) ; "Twilight of the Idols with the Antichrist and Ecce Homo"

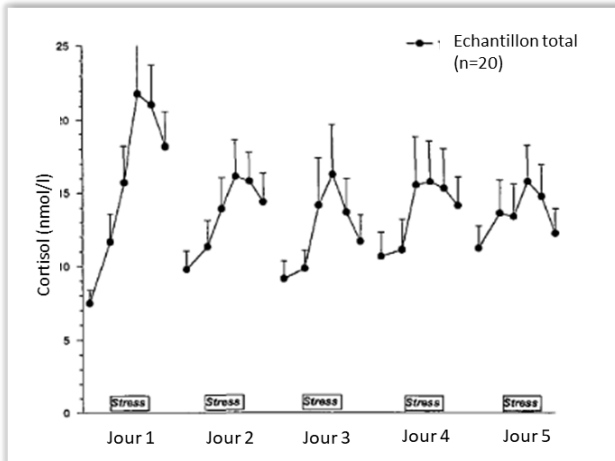


Figure 11. Modification de la sécrétion de cortisol en fonction de la répétition de la confrontation à un même stressor (*Trier Social Stress Test*). Moyenne + erreur standard. Figure extraite de : "Persistent High Cortisol Responses to Repeated Psychological Stress in a subpopulation of Healthy Men", Kirschbaum et al. (1995).

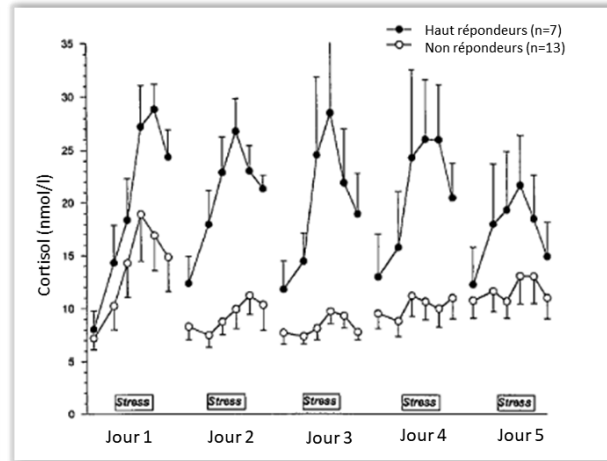


Figure 12. Modification de la sécrétion de cortisol en fonction de la répétition de la confrontation à un même stressor et de l'intensité de la réponse (*Trier Social Stress Test*). Les hauts répondeurs (n=7) sont comparés aux non répondeurs (n=13). Moyenne + erreur standard. Figure extraite de : "Persistent High Cortisol Responses to Repeated Psychological Stress in a subpopulation of Healthy Men", Kirschbaum et al. (1995).

#### 1.1.4.2.6. Avantages et limites des mesures physiologiques

Même si les paramètres physiologiques ont l'avantage d'être objectifs, et donc moins sujets aux attentes des expérimentateurs et des participants que les marqueurs psychologiques, ils demeurent des marqueurs indirects et parfois non spécifiques du stress. En effet, les mesures physiologiques vont être sensibles aux besoins métaboliques spécifiques de la situation. Par exemple, si la situation stressante est une prise en charge d'un patient en urgence par un professionnel de santé, elle peut nécessiter de nombreux déplacements/mouvements (e.g. massage cardiaque). De façon similaire, une compétition sportive peut générer un stress important, cependant la pratique physique va interférer avec les mesures physiologiques du stress. Ces mouvements, liés à l'activité de l'individu en situation, engendrent une augmentation de la fréquence cardiaque qui est indépendante du niveau de stress vécu. Ces mouvements vont également provoquer de nombreux artéfacts qui peuvent impacter la qualité d'enregistrement du signal et de son analyse (e.g. perte potentielle du signal lorsqu'on applique une procédure de traitement pour supprimer les bruits/artéfacts). Au sein des études écologiques, lorsque les conditions ne permettent pas de limiter ces mouvements, il est donc primordial de compléter ces analyses par des mesures subjectives du stress. Dans un contexte d'études de laboratoire, les situations peuvent être plus standardisées afin de limiter ces biais (position assise pendant une durée fixe). Une approche multidisciplinaire est toutefois indispensable car les mesures subjectives

permettent de vérifier dans quelles mesures les stresseurs ont impactés consciemment l'individu.

#### 1.1.5. Inductions du stress

Nous venons de décrire différents marqueurs et outils de mesures du stress aigu. Mis en commun, ces résultats montrent quelques dissimilitudes, comme des corrélats neuroanatomiques partiellement différents, ou des intensités d'activations variables de l'axe HHAC. Ces dissimilitudes *i)* soulignent la difficulté de caractériser le stress et *ii)* accentuent la nécessité de développer des études capables d'enrichir les connaissances sur les causes et les effets du stress. À ce jour, un nombre considérable de protocoles d'induction du stress ont été utilisés. Au sein de ces protocoles, deux grandes catégories se distinguent : les stresseurs psychologiques et les stresseurs physiologiques.

##### 1.1.5.1. *Stresseurs psychologiques*

Les stresseurs psychologiques regroupent une variété d'outils (images négatives, rappels autobiographiques, tâches cognitives, tâches d'expressions publiques) qui sont utilisés de manière isolée ou combinée. Les stresseurs psychologiques menacent directement l'intégrité sociale, vécue, ou imaginée, et engendrent une réponse d'auto-préservation sociale.

##### 1.1.5.1.1. *Inductions par visionnage d'images et imagerie*

Les procédures d'induction émotionnelle consistent à présenter un matériel, tel que des images ou un film, pour susciter automatiquement un état affectif (pour une définition des termes émotion, affect et humeur, voir Annexe 6). Des bases d'images standardisées existent, telles que l'*International Affective Picture Series* qui est à ce jour l'une des procédures les plus utilisées dans le cadre des inductions émotionnelles en laboratoire (Lang et al., 2001). Les images présentées à l'individu sont catégorisées selon leurs caractères plaisants, désagréables, ou neutres, ainsi que leur niveau d'intensité. Des images menaçantes, désagréables, et/ou choquantes telles que des accidents ont été utilisées pour induire un stress (Goodman et al., 2013; Yang et al., 2007). Le stress psychologique peut être également induit par visionnage d'un film fortement aversif accompagné d'une instruction d'autoréférence, c'est-à-dire que le sujet a pour consigne de s'imaginer dans les situations présentées (Hermans et al., 2011; Qin et al., 2009). Dans d'autres instructions autoréférencées, il est demandé aux individus de ressentir une humeur décrite par une série de déclaration (Gilet, 2008). Certaines procédures font appel à des vécus autobiographiques,

les participants devant alors se remémorer une situation dans laquelle ils percevaient un stress (Sinha et al., 2004). Ensemble, ces outils d'inductions se révèlent facilement applicables lors des protocoles où les mouvements des participants doivent être restreints, comme par exemple lors de séances d'imageries anatomiques fonctionnelles cherchant à définir les patterns d'activations cérébrales lors d'une réponse de stress (Hermans et al., 2011; Qin et al., 2009; Sinha et al., 2004).

#### 1.1.5.1.2. Inductions par des tâches cognitives

Plusieurs tâches cognitives telles que le Stroop (stress d'interférence), des tâches de calcul mental (e.g. *Paced Auditory Serial Addition Task*), ou encore une tâche d'apprentissage verbal ont été utilisées comme stresseurs (Gianaros et al., 2005; Hilgarter et al., 2021; Nogawa et al., 2007; O'Súilleabháin et al., 2019; Prinsloo et al., 2011). La mise en place d'un niveau de difficulté excessif, voire même d'une impossibilité à réaliser ces tâches, conduisent les individus à développer un sentiment d'échec, qui peut être accentué avec un couplage de retours négatifs explicites ou implicites. L'induction d'un stress au moyen des tâches cognitives est facile à mettre en œuvre, cependant, dans le cas où ces exercices sont réalisables, l'efficacité d'induction peut être particulièrement sensible aux compétences cognitives individuelles. Par exemple, une personne douée en inhibition cognitive ne sera que faiblement impactée par la tâche de Stroop. Certains protocoles ont habilement contourné cette difficulté en ajustant le niveau de difficulté de la tâche en fonction des capacités individuelles initiales. C'est le cas du test *Montreal Imaging Stress Test* dont le niveau de difficulté de la tâche de mathématiques est modulé de manière à ce que 20 % à 45 % de bonnes réponses soient respectés (Dedovic et al., 2005). L'utilisation de tâches cognitives comme stresseur soulève cependant un point important et potentiellement problématique. En effet, on peut distinguer deux catégories de stresseurs : le stresseur intrinsèque, où le stress est directement provoqué par la tâche, et le stresseur extrinsèque, où le stress est provoqué par quelque chose extérieure à la tâche (e.g. stimulus sonore) (Sandi, 2013). Lorsqu'on s'intéresse aux effets du stress sur les capacités cognitives, si le stresseur utilisé est de type cognitif, il devient alors difficile de distinguer l'effet de la cause (i.e. distinction entre capacité à gérer le stress et capacité cognitive).

#### 1.1.5.1.3. *Inductions par des tâches d'expressions publiques*

Dans les tâches d'expressions publiques et d'interactions verbales, les participants doivent interagir avec un expérimentateur, un autre participant, devant une caméra, ou face à leur reflet (Pulopulos et al., 2019). Il s'agit généralement de tâches oratoires dans lesquelles ils prononcent un discours sur un sujet donné (entretien d'embauche, défense personnelle face à une accusation de vol) ou discutent d'un sujet personnel tel qu'une expérience de vie négative ou un aspect de leur personnalité (Plans et al., 2019; Smeets et al., 2006).

#### 1.1.5.1.4. *Trier Social Stress Test*

Le *Trier Social Stress Test (TSST)* est le protocole de référence d'induction d'un stress aigu en laboratoire. Dans sa version originale, le *TSST* comporte une période d'anticipation précédant un événement stressant (10 min). L'événement stressant est un test de 10 minutes composé d'un entretien d'embauche simulé, suivi d'un calcul mental difficile ; les deux parties du test sont effectuées face à un jury adoptant un comportement strict (Kirschbaum et al., 1993). En outre, les participants sont informés qu'ils seront filmés durant l'ensemble du test et que le film sera visionné et analysé par des spécialistes du comportement verbal et non-verbal. L'ajout de la caméra a ici pour but de renforcer l'aspect d'évaluation social du stress. Ce stressor permet d'induire une forte activation de l'axe HHAC, c'est-à-dire une augmentation importante du niveau de cortisol sécrété. Le *TSST* est un stressor psychosocial peu prévisible et contrôlable, il est considéré comme le *gold-standard* dans le domaine du stress car il présente une grande validité conceptuelle et écologique (Shields et Slavich, 2017).

#### 1.1.5.2. *Stresseurs physiques*

Les stressors physiques regroupent différents types de stimulations sensorielles : stimuli sonores (bip aigu), visuels (flash lumineux intenses), électriques, froids/chauds (Berg et al., 2015; Goodman et al., 2013). Certains stressors physiques comme les chocs électriques ou l'application d'un froid prolongé sont également décrits comme des stimuli douloureux. Dans ces tâches d'exposition, les participants sont soumis à un stimulus fort, de manière intermittente et aléatoire ou en continu. Le *Cold Pressor Test* est largement utilisé dans la littérature scientifique. Durant ce protocole, les volontaires doivent immerger leurs pieds ou leurs mains dans une eau glacée (< 4 degrés) durant quelques minutes (de 1 à 3 minutes) (Lovallo, 1975; Porcelli et al., 2008; Skoluda et al., 2015). Les stressors physiologiques menacent l'intégrité physique et engendrent donc une réponse d'auto-préservation physique.

#### 1.1.5.3. *Inductions par injections*

Certaines études ont cherché à reproduire les effets du stress en utilisant des produits pharmacologiques mimant les effets des hormones impliquées dans les réponses de stress. Des administrations d'hydrocortisone sont ainsi sensées refléter les processus naturels d'activations de l'axe HHAC (sécrétion du cortisol) (Buchanan et Lovallo, 2001; Henckens et al., 2012; Lupien et al., 1999). D'autres études ont administré des bêta-adrénergiques antagonistes, pour reproduire les processus d'activation de l'axe SSAM et simuler les effets des catécholamines (Alexander et al., 2007).

#### 1.1.5.4. *Stresseurs psychophysiologiques*

Les stresseurs physiques engendrent des réponses d'activations physiologiques relativement similaires entre les individus, cependant la variabilité de ressenti est importante. Par exemple, le fait de plonger sa main dans une eau à basse température peut être perçu comme quelque chose de désagréable/douloureux, sans pour autant être stressant pour certains individus. Afin d'homogénéiser les réponses physiologique et psychologique face au stresseur, des stresseurs psychophysiologiques ont été développés plus tardivement. Le *Socially Evaluated Cold Pressor Test (SECPT)* regroupe un stresseur physiologique, à savoir l'induction du froid (e.g. *Cold Pressor Test*, décrit précédemment) avec un stresseur psychologique, qui est une évaluation sociale négative concomitante. Durant l'immersion, le volontaire est filmé et l'expérimentateur demande de manière stricte aux participants de maintenir l'immersion (Dolfen et al., 2019; Sängler et al., 2014; Schwabe et al., 2009; Wirkner et al., 2013). D'autres stresseurs seront alors construits sur une variété d'outils comparables, par exemple le *Mannheim Multicomponent Stress Test* qui combine simultanément des facteurs de stress cognitifs (calcul mental), émotionnels (images affectives), physiques (acoustiques bruit blanc), et motivationnels (perte d'argent) (Reinhardt et al., 2012).

#### 1.1.5.5. *Simulations écologiques*

Hormis quelques exemples précis, tels que l'entretien d'embauche du *TSSST*, les stresseurs précédemment présentés ne permettent pas de réaliser des comparaisons directes avec les situations stressantes du quotidien. Afin d'étudier dans un contexte expérimental les effets du stress générés par des situations stressantes réelles, un nombre grandissant d'études se sont intéressées à la simulation et à la réalité virtuelle (Bajunaid et al., 2017; Brouwer et al., 2011; Liu et Zhang, 2020). Les exercices de simulations permettent de reproduire des



situations écologiques quotidiennes ou d'en créer des inédites. Les simulations sont fréquemment utilisées afin d'entraîner les professionnels de divers champs à la gestion de situations de crises (e.g. militaires, professionnels de santé). Les situations simulées représentent des situations que les individus ont été, ou bien seront, potentiellement amenés à rencontrer dans l'exercice de leurs fonctions. Par exemple, dans un contexte militaire, des soldats ont subi un exercice de simulation de prisonnier de guerre épuisant, totalement inattendu et incontrôlable (Taverniers et al., 2013). Durant ce scénario, les participants ont été brusquement capturés, contraints physiquement et interrogés (Taverniers et al., 2013). Dans une seconde étude chez des personnels militaires, une réponse de stress a été déclenchée par un événement à haut risque (i.e. premier saut en parachute) (Taverniers et al., 2011). Dans un autre contexte, la simulation haute-fidélité a été également utilisée dans le but de former les professionnels de santé à la gestion de situations stressantes (e.g. prise en charge de patients en état critique). Des stresseurs additionnels peuvent ainsi être intégrés dans le scénario tels que des bruits (volume et alarmes des moniteurs, bruit constant des communications) ou une évaluation sociale concomitante, avec par exemple un acteur remettant en question les actions et les décisions du soignant (Bajunaid et al., 2017; Leblanc et al., 2012). Même si les enjeux d'une simulation ne seront jamais les mêmes que ceux d'une situation réelle (e.g. faux patient *versus* vrai patient), ces situations permettent d'étudier le stress dans des situations proches de la réalité. S'il est attendu que les niveaux de stress ressentis soient comparables, ils ne seront par conséquent pas strictement transposables.

#### 1.1.5.6. *Etudes du stress in situ ou réelle*

Certaines études se sont intéressées à caractériser les effets du stress en situation réelle, comme lors d'un examen scolaire (Helbig et Backhaus, 2017). Elles ont également cherché à déterminer l'impact des stresseurs répétés en milieux professionnels sur la performance, le bien-être, le sommeil, la santé mentale ou physique des individus (Gurman et al., 2012; Leblanc et al., 2012). Certaines de ces études ne se sont pas arrêtées au constat, bien souvent délétère des effets du stress, mais ont également exploré l'impact de techniques de gestion émotionnelle chez des professionnels soumis à des hauts niveaux de stress (e.g. professionnels de santé, militaires) (Lemaire et al., 2011; Stillwell et al., 2017; Trousselard et al., 2015).

## 1.2. Impacts du stress

Les effets du stress aigu et chronique sont multiples dans la mesure où le stress impacte le bien-être, les performances et, plus généralement, la santé. Il a aussi été fréquemment observé que le stress affecte les capacités cognitives, différents modèles théoriques ayant été proposés pour expliquer ces effets. Les avancées technologiques en neuroimagerie ont permis d'identifier qu'un certain nombre de zones cérébrales impliquées dans les fonctions exécutives (mémorisation, flexibilité, inhibition) possédaient une forte concentration en récepteurs aux glucocorticoïdes, faisant de ces régions des zones cibles du stress. Lorsque le stress est trop intense ou répété, son impact bascule dans le domaine de la pathologie avec des répercussions individuelles sur la santé physique et mentale, mais avec aussi des répercussions collectives (e.g. arrêt de travail, comportements addictifs compensatoires, inadaptés voir dangereux).

### 1.2.1. Impact du stress aigu : effets sur les performances

À ce jour, de nombreux travaux ont modélisé l'impact du stress sur les performances cognitives et motrices et deux approches conceptuelles se distinguent (Northern, 2010; Sandi, 2013; Staal, 2004; Vine et al., 2016). La première stipule qu'une modification des performances résulterait d'un changement des patterns attentionnels, alors que la seconde attribue la détérioration des performances à une compétition entre les zones cérébrales ayant pour fonction de répondre aux besoins de gestion émotionnelle et cognitive.

#### 1.2.1.1. *Modèles théoriques, anxiété, stress et les performances*

##### 1.2.1.1.1. *Théories attentionnelles*

Deux systèmes attentionnels forment la base du fonctionnement exécutif central. Le premier est associé à un contrôle conscient et orienté intentionnellement vers un but (contrôle *Top-down*), le second plus automatique et guidé par les stimuli saillants (contrôle *Bottom-up*) (Corbetta et Shulman, 2002). En général, les deux systèmes fonctionnent en équilibre cependant, en situation de menace, cette harmonie est perturbée. L'hypothèse principale de la théorie du contrôle attentionnel est que l'anxiété augmente l'allocation de ressources attentionnelles à la détection de stimuli liés à une menace, laissant moins de ressources disponibles au sein du système de contrôle volontaire (Eysenck et al., 2007). Dans

le cas où la source du stress est dissociée de la tâche à accomplir (i.e stress extrinsèque)<sup>14</sup>, le manque d'attention porté sur la tâche conduit alors à un déclin de la performance. La théorie du contrôle attentionnel propose une mise à jour et un approfondissement de la théorie de l'efficacité du traitement proposée par les mêmes auteurs une dizaine d'année plus tôt (Eysenck et al., 2007). Puisque le stress réduit les ressources disponibles pour le contrôle attentionnel, cette théorie suggère que les fonctions exécutives qui reposent en grande partie sur le contrôle de l'attention, tel que l'inhibition, seront particulièrement affectées (Northern, 2010). Ainsi, différents modèles attentionnels ont à ce jour été proposés (Fig. 13).<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : stresseurs psychologiques : Induction par des tâches cognitives.

<sup>15</sup> Le "Integrative framework of stress, attention, and visuomotor performance" de Vine et al. 2016 est présenté en Annexe 2.



### 1.2.1.1.2. Effet du stress sur les processus attentionnels : oculométrie

L'oculométrie est un outil efficace pour valider ou réfuter les modèles théoriques liés au contrôle attentionnel visuel. Cette technique permet d'enregistrer et de déterminer à posteriori les patterns d'explorations visuels (Fig. 14). Les analyses peuvent porter sur la détermination des saccades oculaires qui permettent de définir l'ordre et la priorisation des informations visibles échantillonnées. Elles peuvent également porter sur les temps de fixation qui sont le reflet de l'attention portée à ces informations. L'attention correspond à un processus de sélection d'un stimulus externe (un son, une image, une odeur) ou interne (pensée), ainsi qu'au maintien de ce stimulus à la conscience. Les cartes de chaleur permettent d'identifier l'exploration moyenne sur une période de temps fixe et ainsi d'obtenir les informations saillantes pour le participant. Les scènes analysées sont des stimuli, des images, ou des films projetés sur un écran d'ordinateur, ou des vidéos enregistrées par un oculomètre ambulateur (i.e. lunettes portées par les participants) (Felmingham et al., 2011; Herten et al., 2017; Sanchez et al., 2013; Wilson et al., 2009).

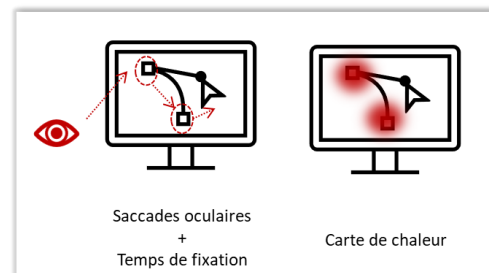


Figure 14. Principes de l'oculométrie. Pour un même stimulus, l'oculométrie permet de définir les patterns d'explorations visuelles qui représentent les points saillants d'attention visuelle (en rouge). Différentes méthodes d'analyses peuvent être utilisées (saccades oculaires, des temps de fixation, ou encore la carte de chaleur).

Dans une tâche visuomotrice de tirs au but, Wilson et al. (2009) ont montré que les footballeurs fixaient plus longtemps le gardien en condition de stress qu'en condition contrôle. Ces modifications attentionnelles ont entraîné une diminution significative de la précision du tir, ces derniers étant plus orientés sur le gardien. Plus récemment Herten, Otto et Wolf (2017) ont montré que l'induction d'un stress psychosocial altérait les comportements de fixation visuelle. À l'aide de lunettes de suivi oculaire, ils ont analysé les patterns d'exploration visuelle des participants confrontés au *TSST*<sup>16</sup>. Le *TSST* implique une confrontation avec un jury représentant la source du stress. Selon la théorie du contrôle attentionnel, le jury devrait faire l'objet d'une attention dirigée et ciblée. Cependant, les auteurs ont montré qu'en comparaison avec un groupe non stressé, les temps de fixation au niveau des visages du jury (stimuli social menaçant) diminuaient dans le groupe stress.

<sup>16</sup> Pour plus de détail voir chapitre précédent : Induction du stress : les stressors psychologiques.

Toutefois, les objets que le jury prenait en main faisaient l'objet d'un biais d'attention important caractérisé par une augmentation des temps de fixation. Ces résultats suggèrent que les individus évitaient la menace sociale la plus saillante, matérialisée ici par le regard des membres du jury. Les biais d'attention n'étaient pas portés sur le jury directement mais sur les objets qu'ils manipulaient, ainsi ces résultats ne valident que partiellement le modèle théorique. L'échantillonnage des informations, qui est défini par les processus attentionnels à un instant  $t$ , aura des effets sur les performances mnésiques ultérieures. Les résultats de l'étude d'Herten et al. (2017) ont montré que les sujets stressés qui augmentaient leurs temps de fixation vers les objets manipulés par les membres du jury avaient une meilleure mémoire lorsqu'ils étaient retestés le jour suivant. Ensemble, ces études montrent que les processus attentionnels durant un événement stressant ont une importance majeure, tant pour la performance immédiate que celles à venir.

#### *1.2.1.1.3. Théories neurophysiologiques*

Le cerveau contient un nombre important de récepteurs aux glucocorticoïdes (RM et RG), les régions qui expriment des niveaux élevés de récepteurs étant plus sensibles au stress<sup>17</sup>. Il a longtemps été admis que les effets des glucocorticoïdes sur la cognition s'exercent principalement par l'intermédiaire des RG. Toutefois, Vogel et ses collaborateurs (2016) ont récemment proposé que la fixation du cortisol sur les RM déclenche d'abord un changement rapide du recrutement de zones spécifiques neuronales, puis l'activation des RG induit des changements plus lents et durables. L'exposition à un événement stressant intense modifie les stratégies de réalisation des tâches (Vogel et al., 2016). Les tâches nécessitant habituellement un traitement flexible vont être traitées à l'aide de stratégies plus contrôlées (Fig. 15).

---

<sup>17</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : réponse cérébrale de stress aigu : récepteurs aux glucocorticoïdes.

Au repos, sans situation stressante, les ressources neuronales et cognitives disponibles sont majoritairement allouées au CPF et à l'hippocampe. Ainsi, les fonctions cognitives assurées par ces structures, telles que la mémoire épisodique, déclarative, spatiale ou le contrôle exécutif, peuvent se réaliser normalement.

En cas d'exposition à une situation stressante, le pattern de ressources neuronales se modifie, les ressources allouées aux CPF et l'hippocampe devenant minoritaires au profit d'une allocation plus grande pour l'amygdale et le striatum dorsal. Dans ce contexte, les processus cognitifs majoritaires sont l'attention, la vigilance, la mémoire émotionnelle, et les processus d'apprentissage.

Ainsi, le stress augmente l'activité des régions cérébrales qui permettent une réponse rapide face à la menace, tout en diminuant de manière transitoire les régions qui soutiennent une pensée flexible et orientée vers un but (Gagnon et Wagner, 2016).

Les modifications des réseaux fonctionnels peuvent être adaptatives si la réponse à fournir est de type fuite ou combat. Lors d'un événement stressant où un haut niveau

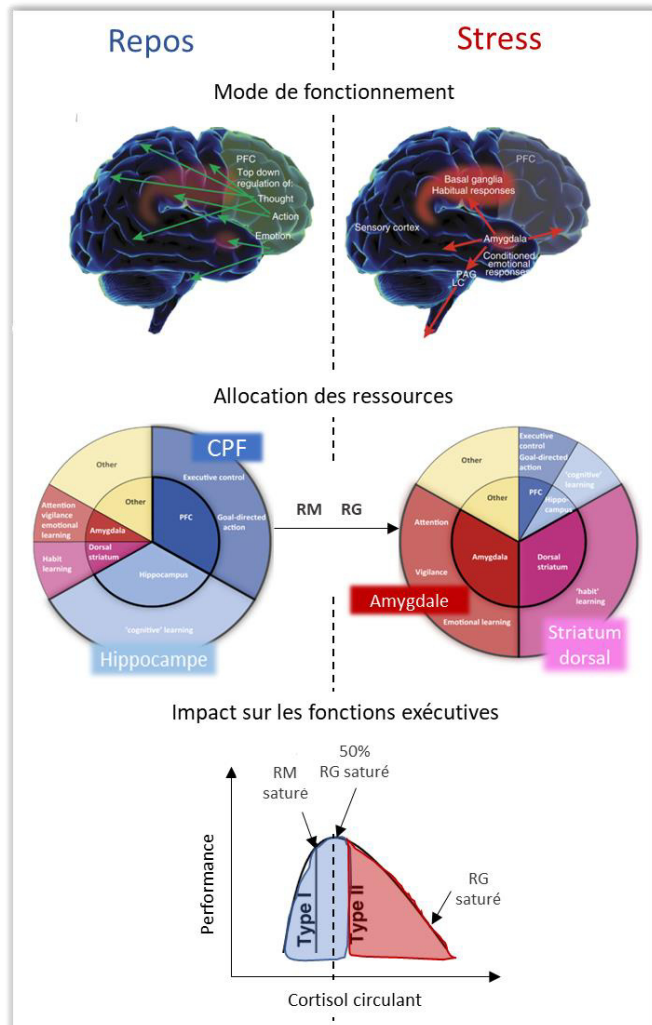


Figure 15. Théorie neurophysiologique de l'impact du stress sur les fonctions exécutives. Mode de fonctionnement : figure extraite et adaptée de "Stress weakens prefrontal networks: molecular insults to higher cognition" Arnsten (2015). Allocation des ressources : les cercles représentent les ressources cognitives et neurales hypothétiquement disponibles. Au repos, les ressources sont principalement allouées à l'hippocampe et au cortex préfrontal (CPF), permettant les processus de contrôles exécutif complexes. Lors d'un stress aigu, on observe un changement dans l'allocation des ressources vers l'amygdale et le striatum dorsal, ce qui favorise la vigilance. Parallèlement, moins de ressources sont disponibles pour d'autres processus cognitifs exigeants supportés par l'hippocampe ou le CPF. Figure extraite et adaptée de "Cognitive Adaptation under Stress: A case for the Mineralocorticoid Receptor", Vogel et al. (2015). Impact sur les fonctions exécutives : exemple de la relation en U inversé entre performance mnésique et niveau de cortisol circulant. Figure extraite et adaptée de "The effects of stress and stress hormones on human cognition: Implications for the field of brain and cognition", Lupien et al. (2007).

d'adaptation est attendu la diminution des ressources du CPF va cependant entraîner une détérioration des performances (inhibition, flexibilité, mémoire de travail).

#### 1.2.1.2. *Effets du stress aigu sur la cognition*

Une réponse de stress aigu est souvent préjudiciable à la fois au bien-être et aux performances cognitives. Plus spécifiquement, le stress aigu affecte les principales fonctions exécutives telles que la mémoire de travail, la flexibilité et l'inhibition (Duan et al., 2019; Plessow et al., 2012; Schoofs et al., 2008; Shields et al., 2016; Starcke et al., 2016; Taverniers et al., 2010; Woodcock et al., 2019a)<sup>18</sup>. Du fait que ces capacités cognitives restent nécessaires pour la résolution des problèmes quotidiens et exceptionnels, le stress a des conséquences néfastes dans de nombreux contextes personnels et professionnels.

##### 1.2.1.2.1. *Fonctions exécutives supérieures*

La cognition définit notre « appareil à penser » et regroupe différentes fonctions incluant l'attention, la mémoire, la perception, le langage et le raisonnement. Les fonctions exécutives nous permettent de nous adapter spécifiquement aux nombreuses variations de notre environnement. Elles permettent d'exécuter correctement une action (organiser, planifier, faire preuve d'abstraction, être flexible, inhiber une action non adaptée). Avant de préciser les effets du stress sur les fonctions exécutives supérieures, nous présenterons brièvement dans la partie suivante quelques paradigmes expérimentaux utilisés en neurosciences cognitives permettant d'évaluer les capacités mnésiques, d'inhibitions, et de flexibilités mentales. Les capacités cognitives sont déterminées à l'aide de scores indexés sur les temps de réaction, le taux d'erreurs ou encore des indices spécifiques propres à chaque tâche.

**Stress et mémoire.** Le fonctionnement mnésique distingue généralement les phases d'encodage, de rétention, et de récupération des informations. Brièvement, la mémoire peut être distinguée en deux systèmes : la mémoire à long terme (déclarative *versus* procédurale) et la mémoire à court terme appelée aussi mémoire de travail. La tâche de *n-back* est fréquemment utilisée pour mesurer les processus de mémoire de travail, qui permettent le stockage à court terme et la manipulation d'informations. Dans la tâche de *n-back*, des stimuli (lettres ou chiffres) sont présentés un à un dans un ordre aléatoire. Les participants doivent

---

<sup>18</sup> Pour une méta-analyse sur l'impact du stress et du cortisol sur les fonctions exécutives supérieures, voir : "the effects of acute stress on core executive functions : A meta-analysis and comparison with cortisol", Shields et al. (2016).



identifier si le stimulus présenté est différent ou similaire à celui apparu n-fois auparavant (Fig. 16). Le niveau de difficulté de la tâche peut être modulé facilement. Dans la tâche de *2-back*, le participant doit retenir le stimulus visionné deux stimuli plus tôt ; dans la *3-back*, le participant doit mémoriser le stimulus visionné trois stimuli plus tôt. Dans les tâches de fluidité verbale, les participants doivent énumérer dans un temps limité un maximum de mots appartenant à une catégorie choisie, dont la difficulté peut varier (animal : facile, meuble : difficile). Le nombre total de mots et le nombre de mots répétés constituent des indicateurs pertinents de fluidité verbale et de mémoire de travail (répétition).

Dans un contexte de stress, la mémoire est la fonction cognitive qui a été la plus largement étudiée (Oei et al., 2006; Schoofs et al., 2008; Shields et al., 2017, 2016). En 2017, une méta-analyse regroupant plus de 6 200 participants a montré que les compétences mnésiques de la mémoire épisodique étaient affectées différemment par le stress en fonction de son moment d'apparition. Si un stress est vécu avant ou pendant l'encodage, on observe une diminution des capacités de rétention ; à l'inverse, s'il est vécu après l'encodage une amélioration des capacités de rétention est observée. Concernant la mémoire implicite, le stress appliqué pendant l'apprentissage d'une tâche a un effet bénéfique (Sandi, 2013). La mémoire visuospatiale étant, pour sa part, régulièrement détériorée (Shackman et al., 2006).

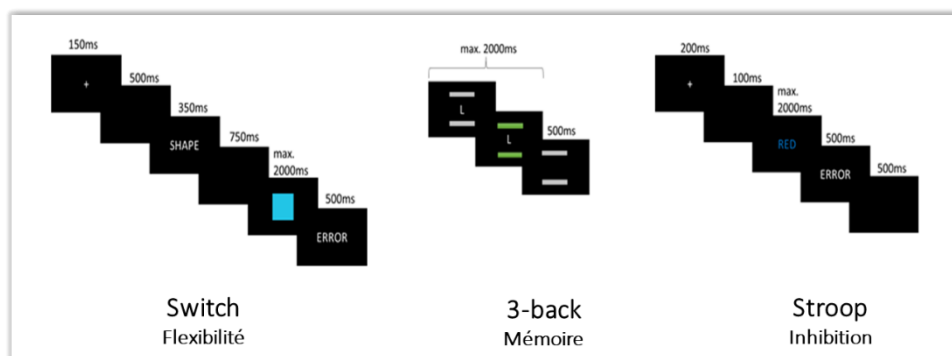


Figure 16. Tâches informatisées permettant l'évaluation des fonctions exécutives (flexibilité, 3-back, et Stroop).

**Stress et inhibition.** L'inhibition d'une réponse est un processus actif permettant d'arrêter ou de supprimer des réponses inappropriées. Deux types d'inhibition ont été décrites : l'inhibition motrice qui correspond à la suppression d'une réponse motrice préconditionnée et l'inhibition cognitive, aussi nommée contrôle des interférences, qui correspond à l'attention ou à l'ignorance sélective d'une information. Le test de *Stroop* est un test neuropsychologique largement utilisé pour évaluer la capacité à inhiber l'interférence cognitive qui se produit

lorsque le traitement d'une caractéristique spécifique du stimulus entrave le traitement simultané d'un deuxième attribut du stimulus (Scarpina et Tagini, 2017). Les instructions données au participant pour la tâche de *Stroop* sont d'identifier la couleur d'un mot écrit tout en ignorant le sens du mot (Fig. 16). Les mots écrits peuvent donner des informations congruentes « rouge, vert, bleu » ou incongruentes « rouge, vert, bleu ». Le score de *Stroop* représente la capacité des participants à inhiber une réponse non pertinente.

Les effets du stress sur l'inhibition ont été peu explorés dans la littérature scientifique et peu de consensus existent sur leurs interactions (Dierolf et al., 2017; Starcke et al., 2016). Il est possible que les effets du stress sur l'inhibition dépendent du type d'inhibition (motrice ou cognitive) (Shields et al., 2016). Comparativement à un groupe contrôle, des participants stressés réalisaient de moins bonnes performances d'inhibition cognitive (tâche de Stroop) (Starcke et al., 2016). En accord avec ces résultats, dans une méta-analyse regroupant 22 études sur les capacités d'inhibitions, Shields et collaborateurs (2016), ont montré que le stress détériorait spécifiquement l'inhibition cognitive.

**Stress et flexibilité.** La flexibilité mentale décrit la capacité à traiter différentes tâches cognitives dont les exigences diffèrent. La flexibilité cognitive regroupe deux ensembles typiques de paradigmes : des tâches simultanées et des tâches séquentielles avec des changements de consignes. Les tâches simultanées, également appelées doubles tâches, sont liées à la coordination et à la sélection d'actions traitées simultanément (ex : *Switch task*). Dans la tâche de *Switch*, quatre stimuli, qui diffèrent par leurs formes et leurs couleurs, sont présentés un à un (Fig. 16). Une commande motrice est associée à la fois avec la réponse liée aux formes et celle liée aux couleurs. Les essais formes et couleurs sont présentés dans un ordre aléatoire, les réponses nécessitant de s'adapter rapidement et continuellement avec la nouvelle consigne. Lors du test de *Wisconsin*, des participants doivent deviner une règle implicite d'association d'une série de cartes selon trois critères : forme, couleur, nombre de symboles. La règle implicite change au cours des essais, on peut ainsi déterminer la flexibilité cognitive en évaluant le nombre de fois durant lesquelles les participants ont persisté dans l'application d'une règle devenue obsolète. Dans le *Trail Letter-Making Test*, des stimuli, distribués aléatoirement sur une feuille papier, doivent être reliés avec un stylo aussi rapidement que possible. Deux feuilles sont présentées, dans la première des chiffres doivent être reliés dans l'ordre croissant (1 → 2, 2 → 3, etc.), dans la seconde des chiffres et des lettres

doivent être reliés dans l'ordre croissant et alphabétique (1 → A, A → 2, 2 → B, etc.). La différence de temps entre la tâche simple et la tâche double (chiffre + lettre) permet alors d'estimer la flexibilité des individus.

Les capacités cognitives de flexibilité mentale sont elles aussi réduites lors d'un stress aigu (Duan et al., 2019; Shields et al., 2016), par exemple, Alexander et collaborateur (2007) ont montré qu'un événement stressant (*TSS7*) avait un impact négatif sur la flexibilité mentale. Ils ont montré que comparativement à un groupe contrôle, les participants du groupe stress avaient des performances diminuées sur une tâche d'anagramme et sur une tâche de *Compound Remote Associates*, ce test demandait aux participants de définir un mot associé à trois mots présentés afin de former des mots composés.

#### 1.2.1.2.2. *Impact du stress sur les performances : les modérateurs*

Les effets du stress sur les performances vont dépendre de nombreux modérateurs tels que la fonction cognitive testée (mémoire implicite ou explicite, mémoire à long terme, flexibilité), la temporalité du stress (avant/pendant/après), l'origine du stress (provoqué par la tâche ou extérieur à la tâche), l'intensité et la durée du stress (aigu *versus* chronique) (Sandi, 2013). Dans un contexte expérimental, en plus du contrôle de ces variables, le niveau de difficulté de la tâche est également important à prendre en compte (Fig. 17, partie A). En effet, seules les tâches de mémoire de travail avec un niveau de difficulté élevé seraient impactées par le stress (Shields et al., 2016). D'un point de vue neurophysiologique, ces différences de performances pourraient être causées par des niveaux d'activation variés au sein du CPF. Qin et al. (2009) ont mis en évidence qu'un stress aigu induit une réduction significative de l'activité liée à la mémoire de travail dans le CPFdl (Fig. 17, partie B). Ces différences d'activations étaient accrues lors d'une tâche difficile (Fig. 17, partie C).

L'ensemble de ces résultats montrent que les effets du stress sur les performances dépendent des caractéristiques du stressor (quand, quoi, et combien de temps) et des caractéristiques de la tâche (fonction testée et niveau de difficulté).

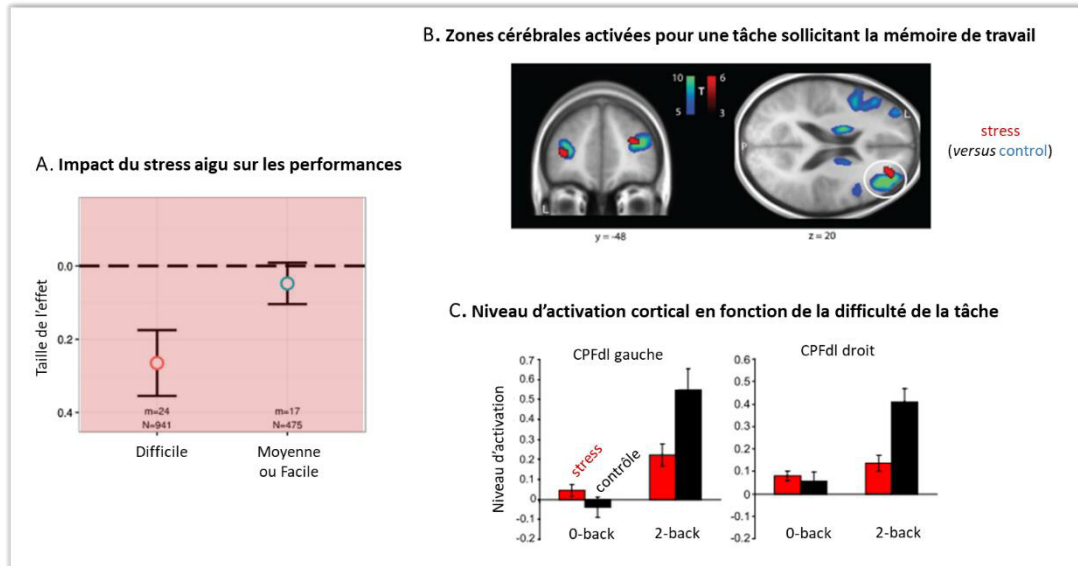


Figure 17. Effets du stress aigu sur une tâche de mémoire de travail pour différents niveaux de difficultés. (A) Les tâches difficiles sont négativement impactées par le stress. Le niveau de difficulté étant défini comme "difficile" si charge de travail était élevée (e.g. 3-back (ou plus), détermination de la mémoire de travail maximale, etc.). Toutes les autres charges étaient considérées comme moyennes ou faciles. Figure extraite et traduite de : "The effects of acute stress on executive functions : A meta-analysis and comparison with cortisol", Shields et al. (2016). (B) Régions cérébrales impliquées dans la mémoire de travail en général (en bleu) et activation réduite dans le groupe stress (rouge) comparativement au groupe contrôle. (C) Niveau d'activation du CPFDl en fonction du niveau de difficulté de la tâche pour les groupes stress (rouge) et contrôle (noir). La n-back est une tâche de mémoire de travail, la 0-back est plus facile que la 2-back. Parties (B) et (C), figures extraites et traduites de : "Acute Psychological Stress Reduces Working Memory-Related Activity in the Dorsolateral Prefrontal Cortex", Qin et al. (2009).

### 1.2.2. Impact du stress chronique : effets sur la santé

En plus de ses nombreux effets délétères sur les performances, le stress constitue un problème de santé majeur car il est associé à un risque augmenté de développement de troubles psychiatriques et physiques. Le stress chronique est associé aux développements et à l'aggravation de nombreuses pathologies physiques (maladies cardiovasculaires, diabète, endocriniennes, troubles auto-immuns, maladies du vieillissement), ainsi qu'à des pathologies mentales (troubles anxieux et dépressifs, épuisement professionnel, stress post-traumatique, troubles alimentaires) (Cohen et al., 2007; Marin et al., 2011; Shields et Slavich, 2017). L'impact du stress sur l'apparition et le développement des cancers (cancer du sein, cancer du col de l'utérus, hépatocarcinome) a également été décrit, même si son impact reste controversé (Baum et al., 2010; Cohen et al., 2007). Par conséquent, le stress chronique constitue un problème de santé publique majeur au XXI<sup>ème</sup> siècle et a des répercussions

économiques considérables (diminution de la qualité de vie, absentéisme professionnel, hospitalisation, etc.) (Kalia, 2002).

Les modèles théoriques suggèrent que l'exposition fréquente à des situations stressantes, ou encore l'incapacité à arrêter la réponse de stress provoquent une activation prolongée de l'axe HHAC et du SSAM et donc une sécrétion prolongée d'hormones du stress. Une activation répétée ou prolongée de ces systèmes interfère avec le contrôle des systèmes cardiovasculaire, immunitaire, et nerveux (Dallman et Hellhammer, 2010). Enfin, cette activation prolongée est mise en cause dans le développement d'un large éventail de changements physiologiques de longue durée.

#### 1.2.2.1. *Marqueurs du stress chronique*

L'induction du stress chronique peut être considérée comme très invasive, c'est pourquoi le stress chronique a été très largement exploré sur les modèles animaux (rongeurs). Les stressors étudiés sont de différentes natures (froid, choc électrique, présence de prédateur, isolement) et sont appliqués de manière répétée, permettant ainsi d'établir des relations de causalité. Des coupes histologiques permettent ensuite de préciser les effets du stress chronique sur les structures cérébrales. Chez l'humain, les effets du stress chronique sont décrits en comparant l'activité de certaines structures anatomiques (e.g. hippocampe, CPF, amygdale) entre des personnes saines et des personnes présentant des maladies mentales associées au stress (dépression, syndrome de stress post-traumatique, syndrome d'anxiété généralisée).

##### 1.2.2.1.1. *Dérèglement de l'axe HHAC*

**Glucocorticoïdes Cascade Hypothesis.** Également connu sous le nom d'hypothèse de neurotoxicité, cette théorie postule qu'une exposition prolongée aux glucocorticoïdes va exercer un effet délétère sur la régulation de l'axe HHAC (Sapolsky et al., 1986). En effet, une exposition fréquente à des stressors et/ou l'incapacité à stopper une réponse de stress après la fin du stressor provoque une sécrétion prolongée de cortisol. Cette dernière affecterait différemment les grands systèmes physiologiques (Dallman et Hellhammer, 2010; Dickerson et Kemeny, 2004; Guiraud et al., 2012):

- Immunitaire : diminution de la prolifération des lymphocytes et de la production de cytokines)

- Cardiovasculaire : développement et progression de certaines maladies chroniques (hypertension, maladies coronariennes, accidents ischémiques)
- Métabolique : développement et progression de certaines maladies chroniques (diabète)
- Nerveux : modifications hippocampiques, amygdaliennes, et orbitofrontales.

Les effets spécifiques du stress chronique sur le cerveau humain ont été très bien documentés dans la littérature scientifique (Lupien et al., 2018; Savic, 2015) et dans cette partie nous les décrivons de manière non-exhaustive.

#### 1.2.2.1.2. Modifications des structures cérébrales

Le cortisol sécrété par les glandes surrénales traverse la barrière hémato-encéphalique et se fixe à ses récepteurs cérébraux, modifiant ainsi leurs activités et les comportements associés induits (Lupien et al., 2018). Les récepteurs aux glucocorticoïdes sont présents en très grand nombre dans l'hippocampe, l'amygdale, et le cortex frontal, c'est pourquoi ces zones cérébrales sont particulièrement vulnérables au stress (Fig. 3)<sup>19</sup>. Nous décrivons, dans la partie ci-dessous, les associations entre le stress chronique et ces trois structures (Fig. 18).

##### 1.2.2.1.2.1. Modifications hippocampiques

Au niveau de l'hippocampe, le stress chronique engendre une perte neuronale, des atrophies dendritiques, une réduction de la neurogénèse dans le gyrus denté, et plus globalement une diminution du volume hippocampique (Lupien et al., 2018, 2007a; Sousa et al., 2008). De telles altérations sont habituellement observées chez des patients présentant des troubles neuropsychiatriques liés au stress. En effet, une réduction du volume de l'hippocampe est régulièrement observée chez des personnes dépressives et présentant un syndrome de stress post-

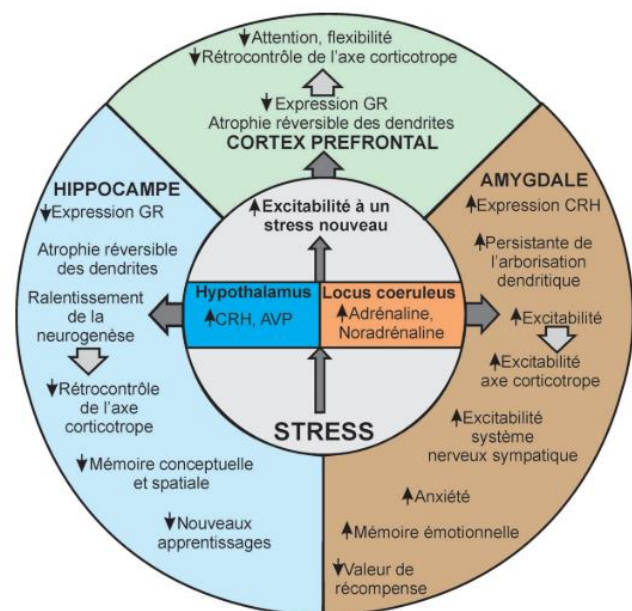


Figure 18. Effets du stress chronique sur différentes structures corticales et sous-corticales. Figure extraite de : "Les bases neurobiologiques et neuroendocriniennes du stress - Stress au travail et santé - Situation chez les indépendants", rapport Inserm (2011).

<sup>19</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : impacts du stress

traumatique (Gianaros et O'Connor, 2010; MacQueen et Frodl, 2011). Des scores élevés sur l'échelle de stress chronique perçu prédisent une diminution du volume de matière grise dans l'hippocampe (Gianaros et al., 2007). Par ailleurs, un volume hippocampique réduit a également été observé chez des personnes saines présentant un faible niveau d'estime de soi (Pruessner et al., 2005). Une faible estime de soi, se traduit par une perception basse de ses ressources internes et constitue de fait un facteur de sensibilité (trait prédictif de la réactivité au stress). Le cortisol semble directement impliqué dans les effets neurotoxiques observés sur l'hippocampe. Au sein d'une étude longitudinale, Lupien et collaborateurs (1998) ont montré que les niveaux de cortisol prédisent le degré d'atrophie hippocampique observé durant le vieillissement. L'hippocampe étant une structure clé de la mémoire, les altérations hippocampiques sont associées à des performances mnésiques détériorées (Lupien et al., 1998) ; par ailleurs l'impact délétère du cortisol sur la mémoire a été largement démontré (Kirschbaum et al., 1996; Woodcock et al., 2019b). Cependant, cette relation de cause à effet (stress → cortisol → réduction hippocampique), quoique très répandue, nécessite une interprétation plus subtile et approfondie. Lupien et al. (2018) ont récemment mis en évidence qu'il serait possible que de petits volumes hippocampiques, au lieu d'être une conséquence de l'exposition, soient également une condition préexistante de vulnérabilité au stress (petit hippocampe → vulnérabilité au stress → développement du stress chronique) (Lupien et al., 2018).

#### *1.2.2.1.2.2. Modifications amygdaliennes et orbitofrontales*

Chez l'humain, le stress induit un remodelage synaptique et une augmentation de l'arborisation dendritique dans l'amygdale basolatérale et médiale (Roosendaal et al., 2009). L'amygdale joue un rôle majeur à la fois dans la consolidation de la mémoire, la régulation des effets du stress et l'encodage d'informations associées aux émotions intenses. La mémorisation des événements stressants peut engendrer des souvenirs traumatiques et le développement de troubles de l'humeur et de l'anxiété (e.g. syndrome de stress post traumatique) (Nursey et Phelps, 2016). Un certain nombre de structures du lobe frontal sont également sensibles aux effets des glucocorticoïdes (cortex dorsolatéral, médial orbitofrontal, gyrus frontal) (Inserm, 2011). Chez l'animal, l'exposition au stress chronique conduit à des atrophies du CPF médial (réduction de l'arborisation dendritique) (Liston et al., 2006). Chez

l'humain, une association négative entre les niveaux de glucocorticoïdes et l'épaisseur du CPFdl gauche a également été observée (Kremen et al., 2010).

Pour conclure, étant donné que l'hippocampe, l'amygdale et le CPF sont des structures cérébrales particulièrement sensibles au stress il paraît aujourd'hui nécessaire d'identifier des techniques capables de contre-carrer la plasticité mal-adaptative de ces structures.

#### *1.2.2.1.3. Stress et développement de troubles cognitifs*

La littérature préclinique et clinique indique que le stress chronique, tout comme le stress aigu, affecte négativement les fonctions exécutives (Girotti et al., 2018). Lors du vieillissement normal et pathologique, le lien entre les sécrétions en cortisol et le développement de troubles cognitifs est relativement bien décrit (Lupien et al., 2018). On observe une association étagée : les patients présentant une démence (ex : maladie d'Alzheimer) sécrètent plus de cortisol que les personnes présentant des altérations cognitives modérées, ces dernières présentant des niveaux de sécrétion en cortisol plus élevés que les personnes en bonne santé (Lupien et al., 2018). De plus, les individus âgés avec des troubles cognitifs modérés et les patients avec une démence ont un volume hippocampique plus petit que leurs homologues en bonne santé (Lupien et al., 2018).

#### *1.2.2.2. Modérateurs du stress chronique*

En plus des modérateurs individuels présentés dans les parties concernant le stress aigu, la vulnérabilité au stress chronique peut aussi être influencée par le passé de l'individu <sup>20</sup>. Le stress chronique peut se développer dans un contexte de vulnérabilité préexistante (stresseur familial ou social) (Lupien et al., 2018). Les traumatismes vécus pendant l'enfance, tels que des soins parentaux faibles ou des abus physiques induisent des dérèglements délétères et permanents de l'axe HHAC et des réponses de stress. Par ailleurs, des prédispositions génétiques auraient un lien avec les réponses de stress. Certains gènes interagissent avec la maltraitance enfantine et prédisent des comportements à risques et des risques augmentés de dépression sévère (MAOA, 5-HTTLPR), d'autres sont associés avec une augmentation des niveaux de glucocorticoïdes et une réduction de l'épaisseur du CPF (Kremen et al., 2010; McCaffery, 2010).

---

<sup>20</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : modérateurs de l'axe HHAC, et chapitre : modérateurs individuels du stress.



- ❖ Le stress aigu impacte le bien-être et les performances, plus particulièrement les fonctions exécutives assurées par le cortex préfrontal (inhibition, mémorisation, flexibilité)
- ❖ Les effets du stress sur les performances sont modulés par le niveau de difficulté de la tâche
- ❖ Le stress chronique est impliqué dans le développement de nombreuses pathologies physiques et

### 1.3. Techniques de coping

Étant donné les impacts délétères du stress aigu et chronique, il est pertinent de chercher à implémenter des techniques susceptibles de contrebalancer ces effets néfastes. Les techniques de gestion du stress, appelées couramment stratégies de *coping* ou d'adaptation, incluent des approches cognitives, comportementales, et physiologiques, qui visent à prévenir et limiter les réponses de stress. L'adaptation (*coping*) est un effort pour faire face à une situation menaçante ou nuisible, pour éliminer la menace ou diminuer les façons dont elle peut avoir un impact négatif sur la personne. Cet effort peut être intentionnel ou automatique/involontaire (Carver, 2010). Les techniques de coping peuvent être implémentées à différents moments : elles peuvent être pratiquées de façon régulière, dans le cadre d'une prévention générale (programme d'apprentissage de la gestion du stress), ou être implémentées de manière spécifique en amont, durant, ou en aval d'une situation stressante (Fig. 19).

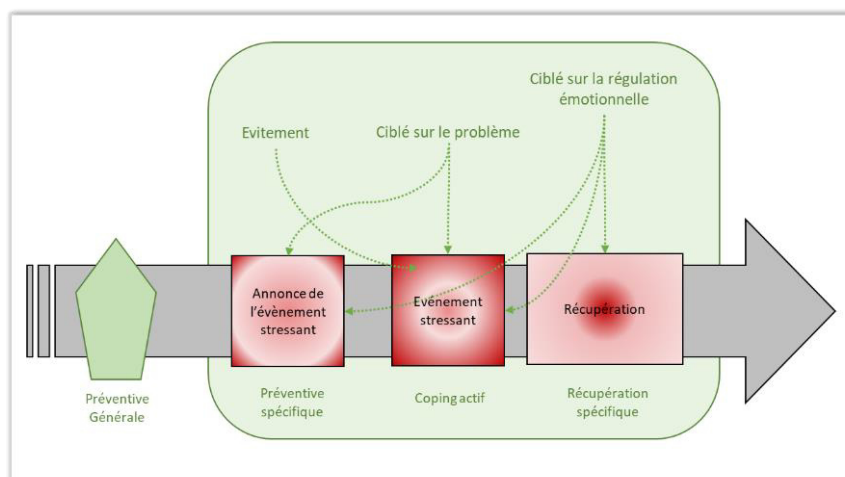


Figure 19. Implémentation de stratégies de gestion du stress en amont et pour les différentes phases d'une réponse de stress. Ces stratégies peuvent s'appliquer conjointement.

Trois catégories de coping ont été distinguées : les approches centrées sur le problème, les approches centrées sur les émotions et les techniques d'évitements (Carver, 2010). L'approche archaïque de fuite ou d'évitement est adaptée si la source de stress est extérieure à la tâche à accomplir. Cependant, de plus en plus de situations nécessitent de se confronter directement au stresser (entretien d'embauche, compétition sportive, examen). Dans ces contextes, des stratégies d'engagements doivent être mises en place par les individus. Déterminer l'efficacité de ces techniques d'engagements (centrées sur le problème ou sur les émotions) relève d'une importance majeure pour réduire le plus efficacement possible les effets délétères engendrés par le stress.

### 1.3.1. Approches centrées sur la résolution du problème

Les approches centrées sur le problème ont pour postulat que la réponse de stress aigu sera moins importante si l'individu exerce un contrôle actif sur la situation stressante. Elles sont donc à privilégier lorsqu'un certain contrôle sur la situation est possible (Carver, 2010). Ce type d'approche peut être utilisé juste avant une situation stressante ou pendant son déroulement (Fig. 19). Son principe repose sur la résolution du problème par l'allocation de ressources additionnelles. Par exemple, lors d'une situation professionnelle stressante, telle qu'une réunion importante, on peut garder sous les yeux les informations pertinentes que l'on souhaite évoquer. Lors d'une situation de prise en charge de soins cliniques critiques, l'utilisation d'aides cognitives peut favoriser la diminution de la charge mentale, et permettre d'allouer de manière adéquate les ressources attentionnelles sur les informations pertinentes liées à la tâche (Lelaidier et al., 2017). L'apport et la disponibilité de ces nouvelles ressources pendant la situation stressante peuvent rendre la situation plus contrôlable, plus prévisible, et donc moins stressante.

### 1.3.2. Approches centrées sur les émotions

La régulation des émotions consiste à manipuler quand, où, et comment l'émotion est ressentie ou exprimée. Cette régulation peut se produire automatiquement ou consciemment (Gross, 1998). Les approches de coping centrées sur les émotions sont à privilégier en cas de manifestations émotionnelles intenses et/ou lors d'une situation qui ne serait que très peu contrôlable par le sujet (e.g. opération chirurgicale pour un patient) (Carver, 2010). Les maladies de longue durée sont par exemple des stresser peu contrôlables. Dans ce contexte,

les patients mettent régulièrement en place des copings tournés vers les émotions comme la spiritualité (Carver, 2010). Les approches émotionnelles semblent particulièrement intéressantes lorsqu'elles sont utilisées en amont ou durant une situation stressante, afin de réduire efficacement l'intensité de la réaction face au stress (Fig. 19). Une utilisation de ces techniques en aval du stress permet d'améliorer la vitesse de récupération post-stress, c'est-à-dire un retour au niveau psychophysologique de base. Ces approches se concentrent sur la conscientisation d'émotions positives, le contrôle corporel et la stimulation corporelle. Les études les plus récentes ont cherché à caractériser les effets de techniques de respiration, de rétrocontrôle cardiaque, ou encore de la stimulation cérébrale transcrânienne à courant continu (Dillon et al., 2016; Plans et al., 2019; Schlatter et al., 2021; Wells et al., 2012). Dans un contexte de stress inhérent à la pratique professionnelle où un haut niveau de performance est attendu, les techniques d'optimisation du potentiel ont également été explorées (Claverie et al., 2020; Sigwalt et al., 2020) <sup>21</sup>.

#### 1.3.2.1. *Techniques de respirations*

Les techniques respiratoires sont au cœur de nombreuses méthodes associées à la régulation émotionnelle, telles que la relaxation, la sophrologie, le yoga et la méditation de pleine conscience. La respiration est une fonction automatique et autorégulée qui dépend de l'activité rythmique et coordonnée de différents muscles respiratoires des voies aériennes supérieures et de la région thoraco-abdominale (Marieb et Hoehn, 2016b). La commande centrale de la respiration implique le système nerveux autonome, qui permet une activité inconsciente et rythmique. La respiration est modulée par des neurones bulbo-pontiques respiratoires localisés dans le tronc cérébral et par certaines aires corticales et sous-corticales. Un circuit est impliqué dans la commande motrice volontaire, un second (limbique et paralimbique) est impliqué dans la perception consciente de la difficulté respiratoire, et un dernier cortico-limbique est responsable d'une régulation volontaire de la respiration.

---

<sup>21</sup> Pour plus de détails voir chapitre suivant : Gestion du stress en simulation

### 1.3.2.1.1. Interactions entre les fonctions cardiaques et respiratoires

Il existe une interaction permanente entre les fonctions cardiaque et respiratoire. Une modification volontaire de la fréquence respiratoire conduit à une modification de la fréquence cardiaque. L'inspiration inhibe temporairement l'influence du système nerveux parasympathique, et produit une accélération de la fréquence cardiaque (tachycardie). A l'inverse, l'expiration va stimuler le système nerveux parasympathique et induire une bradycardie. Cette oscillation rythmique de la fréquence cardiaque produite par la respiration est appelée arythmie sinusale respiratoire (ASR) (Shaffer et al., 2014) (Fig. 20). L'origine de ces oscillations rythmiques peut être associée à plusieurs facteurs tels que l'influence directe des neurones médullaires respiratoires sur les neurones cardio-moteurs, l'influence des barorécepteurs cardio-pulmonaires ou encore des récepteurs à l'étirement des poumons. La stimulation de l'activité baroréflexe, qui est déclenchée par les variations de la pression sanguine dans les vaisseaux de gros diamètre, participe également à cette interaction cardio-respiratoire via les boucles de rétroactions. L'augmentation de la pression artérielle déclenche une réponse parasympathique (et un retrait sympathique), tandis que la diminution de la pression artérielle induit un phénomène inverse.

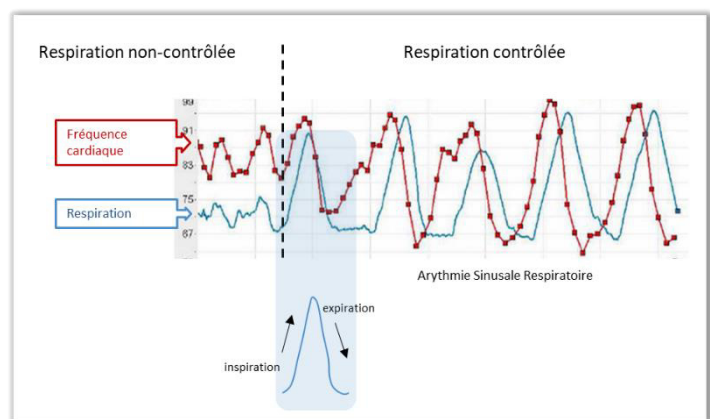


Figure 20. Arythmie sinusale respiratoire. Les rythmes physiologiques du baroréflexe et de la respiration peuvent être coordonnés pour induire des oscillations de fréquence cardiaque de grande amplitude.

L'ASR est l'un des nombreux mécanismes oscillatoires identifiés dans la fréquence cardiaque. Ces oscillations se superposent généralement les unes aux autres et produisent un schéma complexe de rythmicité (Lehrer et al., 2000). Lorsque la fréquence respiratoire est réalisée à la même fréquence que la boucle de rétroaction du baroréflexe (Fig. 20), cela crée une résonance. À cette fréquence de résonance, il existe un potentiel d'oscillation de grande amplitude de la fréquence cardiaque. De manière générale, la fréquence respiratoire qui engendre la plus grande ASR est d'environ 6 cycles par minute (cpm). Au cours d'un travail respiratoire proche de cette fréquence, des améliorations de la VFC ont été observées (Lehrer et al., 2000). À la suite d'un entraînement sur plusieurs séances, on observe également des

gains du baroréflexe. Ces gains permettent à l'organisme de réguler plus efficacement la pression artérielle et les échanges gazeux (Shaffer et al., 2014).

#### 1.3.2.1.2. *Respiration standardisée lente*

La majorité des individus respirent spontanément à une fréquence comprise entre 9 et 24 cpm (Lehrer et Gevirtz, 2014). Cette fréquence peut être modulée par l'individu selon un contrôle conscient de sa respiration. Ainsi, la respiration peut être ralentie à une fréquence fixe dans le but d'engendrer une ASR régulière (Fig. 21) (VanDiest et al., 2014). Cette arythmie régulière contribuerait à augmenter l'activité de la branche afférente du nerf vague (Lehrer et Gevirtz, 2014). Les exercices de respiration relaxante (i.e. ralentie) conduisent à une réduction de l'activité du système sympathique et une augmentation de l'activité parasympathique (Lehrer et al., 2000; Lehrer et Gevirtz, 2014). Ces modifications physiologiques, couplées à la prise de conscience de ces changements, augmentent la relaxation et réduisent les niveaux de stress physiologiques et psychologiques (Wells et al., 2012).

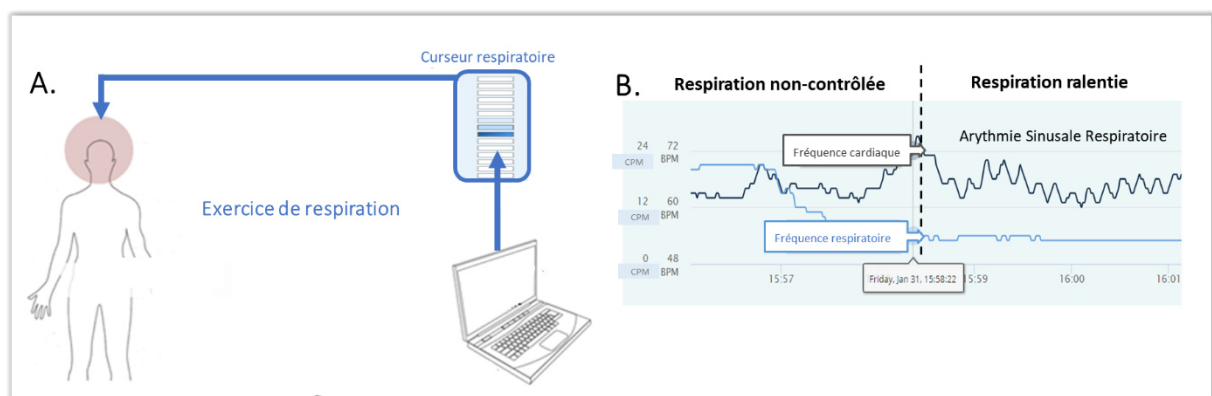


Figure 21. Impact d'un exercice de respiration lente sur la fréquence cardiaque. (A) Un curseur respiratoire à rythmicité fixe est présenté à l'individu. Lorsque le curseur monte, l'individu doit inspirer et lorsque le curseur descend, il doit expirer. (B) La fréquence respiratoire s'exprime en cycle par minute (cpm). Un exercice de respiration ralentie réalisé à une fréquence de 6 cpm conduit à une arythmie sinusale respiratoire régulière qui est caractérisée par une augmentation de la fréquence cardiaque instantanée (battements par minute, bpm) pendant l'inspiration et une diminution pendant l'expiration.

La respiration peut être ralentie et régularisée en réalisant des cycles respiratoires composés d'une inspiration de quatre/cinq secondes suivie d'une expiration de six/cinq secondes (Fig. 21). Ce type de respiration standardisée à 6 cycles réguliers par minute (0,1 Hertz) engendre une ASR qui augmente différents marqueurs de la VFC<sup>22</sup>. Wells et

<sup>22</sup> La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) représente la fluctuation temporelle entre deux intervalles de battement cardiaque adjacents, elle permet de caractériser l'évolution instantanée de la fréquence cardiaque. Une VFC haute montre de bonne capacité d'adaptation. La VFC s'analyse dans les domaines temporel (SDNN, RMSSD, Pnn50 %) et fréquentiel (basses fréquences LF : 0,04-0,15 Hertz, hautes fréquences HF : 0,15-0,40 Hertz). Ces différents marqueurs permettent d'estimer le rapport entre l'activité du système nerveux sympathique et parasympathique. Pour plus de détails, voir chapitre : marqueurs et outils de mesure du stress physiologique : les paramètres cardiovasculaires.

collaborateurs (2012) se sont intéressés aux effets d'un exercice de respiration ralentie dans un contexte de stress. Suite à la pratique d'un exercice de respiration standardisée ralentie (6 cpm) d'une durée de 30 minutes, ils ont montré une amélioration des HF et du ratio LF/HF de la VFC. De plus, cet exercice engendrait une diminution du stress perçu chez les individus présentant des traits d'anxiétés élevés (Wells et al., 2012). Par ailleurs, les exercices de respiration sont également utilisés dans le but d'améliorer la qualité du sommeil. Ils peuvent ainsi être utilisés comme moyen indirect de remédiation du stress. En effet, le manque de sommeil est décrit dans la littérature comme un stresser, et un stress trop important va à son tour pouvoir engendrer des troubles du sommeil. Dès lors, stress, anxiété et sommeil entretiennent un cercle vicieux (Cox et Olatunji, 2020; Gould et al., 2018; Sonnenschein et al., 2007). Déterminer des moyens d'améliorer le sommeil permettrait de contrecarrer cette spirale psychophysiologique négative. Un entraînement régulier à la respiration ralentie (15 min/jour sur 30 jours), permettrait une amélioration du sommeil (évaluation subjective) et de l'activité vagale durant la nuit chez des sujets sains (Laborde et al., 2019).

Même si la fréquence de 6 cpm permet de développer une grande ASR, déterminer en amont la fréquence de résonance de chaque individu permettrait de potentialiser les effets bénéfiques liés aux exercices de respiration (Lehrer et al., 2000). Dans leur essai contrôlé randomisé, Caldwell et Steffen (2018) ont comparé les effets d'une psychothérapie seule ou combinée à la pratique régulière d'une respiration résonnante individualisée (15 à 20 minutes par jour, 4 à 5 fois par semaine, sur 6 semaines)<sup>23</sup>. Les patients ayant pratiqué en supplément la respiration résonnante ont montré une importante augmentation de la VFC et une diminution significative des symptômes dépressifs.

Pour conclure, les exercices de respiration sont non-invasifs, peu coûteux, et faciles à intégrer : ils peuvent être exécutés avant et/ou après l'avènement d'un événement stressant, et même pendant celui-ci, si la situation le permet. Ils offrent de nombreuses perspectives d'application dans l'optimisation de gestion de situations stressantes, cependant les effets d'interventions courtes restent à être démontrés.

---

<sup>23</sup> Les fréquences de résonance étaient détectées via un rétrocontrôle biologique basé sur la variabilité de la fréquence cardiaque.

- ❖ Les systèmes respiratoire et cardiaque interagissent étroitement
- ❖ Un contrôle volontaire de la respiration entraîne une arythmie sinusale respiratoire
- ❖ Une respiration à 6 cycles par minute entraîne une grande arythmie sinusale respiratoire et est associée avec une réduction des marqueurs psychophysiologiques du stress
- ❖ Les effets d'interventions respiratoires courtes restent peu explorés

#### 1.3.2.2. *Techniques de rétrocontrôles biologiques*

Le rétrocontrôle biologique ou *biofeedback* est parfois décrit comme une alternative prometteuse pour atténuer les réponses de stress, seule ou en complément d'autres techniques de relaxation (DeWitte et al., 2020). Le principe du rétrocontrôle biologique est de fournir aux individus des informations rétroactives immédiates sur leur état physiologique (Fig. 22). De nombreuses techniques de rétrocontrôle biologique ont été explorées et sont basées sur différents marqueurs du stress tels que les niveaux d'activation cérébrale, électrodermale, ou encore les paramètres cardiaques (Brühl et al., 2014; Dupee et Werthner, 2011; Kotozaki et al., 2014; Paret et al., 2014; Subhani et al., 2018). La présentation de ces marqueurs physiologiques en temps réel permet à l'individu d'en prendre conscience et peut l'aider à les moduler volontairement (Goessl et al., 2017a). Dans leur revue systématique de la littérature, DeWitte et collaborateurs (2019) ont cherché à caractériser l'impact de différents rétrocontrôles biologiques sur les marqueurs du stress. Ils ont inclus 14 essais contrôlés randomisés et ont conclu que l'utilisation des rétrocontrôles permettait une diminution des marqueurs psychophysiologiques du stress avec une prévalence des rétrocontrôles basés sur des paramètres cardiaques (9/14 essais). Les rétrocontrôles biologiques basés sur les paramètres cardiaques semblent donc avoir une forte influence dans le pattern observé.

### 1.3.2.2.1. Rétrocontrôles biologiques cardiaques

Le rétrocontrôle basé sur la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC-RETRO) permet de visualiser l'évolution en temps réel des paramètres cardiaques et favorise un contrôle conscient des réponses physiologiques (DeWitte et al., 2019; Goessl et al., 2017a)<sup>24</sup>. La procédure de VFC-RETRO consiste à renvoyer des données de fréquence cardiaque pendant des manœuvres de respiration lente, de sorte que le participant essaie de maximiser son ASR, c'est à dire de créer une courbe sinusoïdale de pics et de creux. Afin d'atteindre une ARS maximisée, le sujet utilise directement le retour visuel ou auditif et/ou un curseur respiratoire à sa disposition (Lehrer et Gevirtz, 2014) (Fig. 22). Cette ASR maximisée est aussi appelée cohérence cardiaque ou encore fréquence de résonance. Le terme de cohérence est utilisé pour décrire le degré de synchronisation entre différents systèmes oscillants comme les systèmes cardiaque et respiratoire (Fig. 23) (Lehrer et al., 2000; Shaffer et al., 2014).

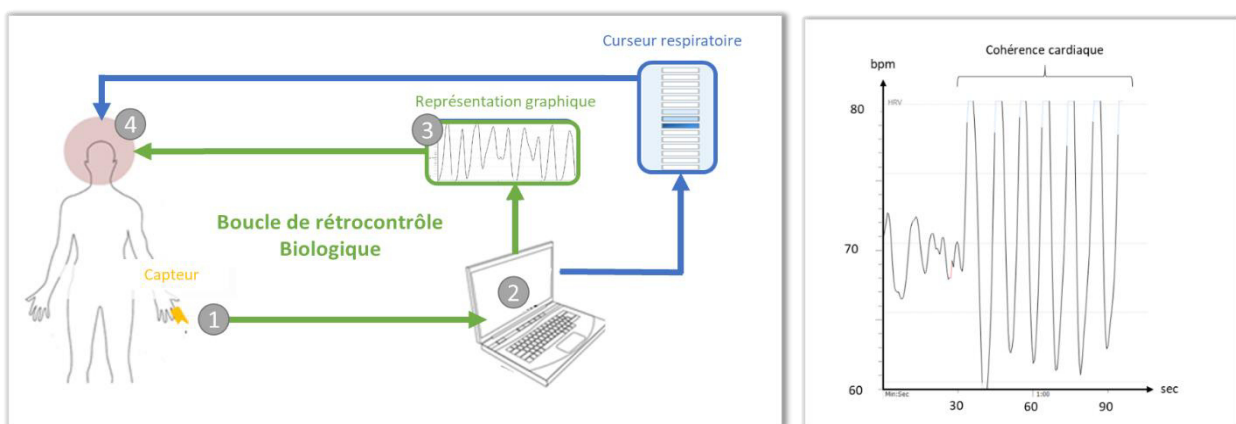


Figure 22. Schématisation d'une procédure de rétrocontrôle biologique (en vert) associée à un exercice de respiration (en bleu). (1) Enregistrement d'une mesure physiologique (ex : fréquence cardiaque). (2) Le signal est traité. (3) Le signal est retranscrit (ex : visualisation de la fréquence cardiaque instantanée). (4) L'individu prend connaissance des changements physiologiques instantanés. Schéma inspiré de : "StressTress : A Metaphorical Visualization for Biofeedback-assisted Stress Management", Yu et al. (2017).

Figure 23. Tracé de cohérence cardiaque (appelé aussi fréquence de résonance ou arythmie sinusale respiratoire maximale). Le tracé de la fréquence cardiaque instantanée est ordonné et ressemble à une onde sinusoïdale d'une fréquence d'environ 0,1 Hertz.

#### 1.3.2.2.1.1. VFC-RETRO, bien-être et santé

Depuis une dizaine d'années, la littérature scientifique rapporte qu'une pratique régulière de VFC-RETRO engendre une diminution des symptômes de stress et d'anxiété (Berry et al., 2014; DeWitte et al., 2019; Gevirtz, 2013; Goessl et al., 2017a). Les effets de sessions répétées de VFC-RETRO ont été largement investigués chez des patients présentant des

<sup>24</sup> Les interventions cardio-respiratoires portent de nombreuses appellations (*Heart rate variability coherence biofeedback, Biofeedback, cardiac biofeedback, HRV-biofeedback, RSA-Biofeedback, resonance frequency biofeedback*).



maladies associées au stress (e.g. phobies, syndrome de stress post traumatique, dépression). Chez des patients souffrants de dépression, des sessions de VFC-RETRO (3 sessions par semaines pendant 2 semaines) diminueraient les symptômes dépressifs et l'anxiété, et augmenteraient la VFC (Siepmann et al., 2008). Une VFC haute témoigne de bonnes capacités d'adaptations cardiovasculaires, et est associée à de nombreux marqueurs de santé et de performance (Colzato et al., 2018; Kemp et Quintana, 2013; Thayer et al., 2012). Chez des patients présentant un syndrome de stress post traumatique, 4 semaines d'intervention diminueraient les symptômes dépressifs et augmenteraient également la VFC (Zucker et al., 2009). En outre, l'étude de Zucker et al. (2009) a mis en évidence que l'augmentation de la VFC était positivement associée à la diminution des symptômes de stress post-traumatique.

Étant donné qu'une diminution de la VFC est observée dans de nombreuses pathologies (e.g. maladies cardiovasculaires, l'obésité) ou dans les douleurs chroniques, les applications potentielles du VFC-RETRO vont au-delà des maladies psychologiques (Berry et al., 2014; Meyer et al., 2018; Mikosch et al., 2010). Par exemple, 4 sessions ont permis de diminuer le ressenti subjectif de douleur et de stress et d'augmenter la cohérence cardiaque chez des militaires vétérans souffrant de douleurs chroniques (Berry et al., 2014). Un entraînement au VFC-RETRO (session 10 min, 2 sessions par jour, sur 6 semaines) a également permis une réduction des symptômes dépressifs, du stress, et une amélioration de la qualité de vie de personnes obèses qui perduraient à 3 mois post-intervention (Meyer et al., 2018). Dans leur étude, Meyer et al. (2018) ont également cherché à déterminer l'impact de 6 semaines d'entraînement sur les réponses de stress. Ils ont montré que l'entraînement permettait une meilleure récupération cardiovasculaire (SDNN augmenté) à la suite d'un stressor cognitif (tâche de Stroop).

Certaines populations saines sont confrontées à un niveau élevé de demande et de stress dans leur environnement de travail. La pratique répétée de VFC-RETRO dans le contexte professionnel permettrait de diminuer l'anxiété et le stress, chez des étudiants en santé, chez des athlètes, ou encore chez des agents correctionnels (Burch et al., 2019; Cutshall et al., 2011; Jiménez Morgan et Molina Mora, 2017; McCraty et al., 2009; Ratanasiripong et al., 2015). Chez des participants sains, Whited et al. (2014) ont également montré que de multiples séances permettaient de moduler les réponses physiologiques durant la confrontation avec un

évènement stressant (tâche de calcul mental). Par rapport au groupe contrôle, les participants entraînés présentaient une réponse du parasympathique augmentée (pNN50).

Jusqu'à ce jour, la pratique ponctuelle reste néanmoins nettement moins explorée. Plans et collaborateurs (2019) ont soumis des participants sains à un stresseur psychologique, puis les ont répartis en 3 groupes : VFC-RETRO, contrôle, ou rumination. Les participants du groupe rumination devaient penser à leur discours et à se concentrer sur des pensées axées sur leur performance. Le VFC-retro, comparativement aux autres conditions, a permis d'améliorer significativement la récupération post-stress avec une augmentation des paramètres de la VFC (RMSSD, Pnn50, HF), bien qu'aucune différence sur les marqueurs subjectifs n'ait été observée. Malheureusement, Plans et collaborateurs ne précisent pas les caractéristiques de leur population (absence de critères inclusion/exclusion, absence de mesures des traits psychométriques standardisées), compliquant ainsi la généralisation de leurs résultats.

D'autres études se sont intéressées aux effets de cette technique sur des personnes présentant des caractéristiques anxigènes élevées (Prinsloo et al., 2013 ; Sherlin et al., 2009a). Dans leurs études, Prinsloo et Serlin ont inclus des participants exposés à des hauts niveaux de stress au travail ou dans leur vie. Ils ont rapporté qu'une session unique d'une durée de 10 min en amont d'un stresseur cognitif (Stroop) permettait de modifier les réponses physiologiques (RMSSD augmenté) durant l'induction du stress (Prinsloo et al., 2013). De manière similaire, l'étude de Serlin (2009) a montré que, comparativement à un faux VFC-RETRO (i.e. interface visuelle renvoyant un signal cardiaque légèrement modifié), 15 min de VFC-RETRO permettait de réduire des marqueurs psychophysiologiques du stress. Ces deux études ont mis en place des protocoles de test / re-test (Stroop 1 – VFC-RETRO – Stroop 2), cependant, le fait que les stresseurs soient temporellement rapprochés rend les interprétations difficiles (Prinsloo et al., 2013 ; Sherlin et al., 2009a). En effet, on peut se demander si la période de pratique du VFC-RETRO concerne plutôt la récupération suite à la confrontation avec le premier stresseur ou bien la préparation au second. Ensemble, ces études suggèrent qu'une session unique de VFC-RETRO peut être suffisante pour observer des effets bénéfiques, cependant l'impact du VFC-RETRO en amont d'un évènement stressant sur des individus sains reste à définir.

#### 1.3.2.2.1.2. VFC-RETRO, VFC et performances

Quelques études se sont également intéressées aux effets du VFC-RETRO dans un contexte d'optimisation des performances (Jiménez Morgan et Molina Mora, 2017; Prinsloo et al., 2011). Une revue systématique a montré qu'un entraînement au VFC-RETRO permettait d'améliorer des variables psychophysologiques (stress et fatigue diminués) ainsi que les performances sur une population d'athlètes (synchronisation, précision, temps de réaction) (Jiménez Morgan et Molina Mora, 2017). La diminution des marqueurs du stress et l'amélioration conjointe de la performance sportive témoignent de l'intérêt du VFC-RETRO lors de situations sportives stressantes (compétition) (Lehrer et al., 2020). Par ailleurs, alors qu'un grand nombre de situations stressantes mobilisent de nombreuses capacités cognitives, les effets du VFC-RETRO sur les performances cognitives restent peu explorés (Prinsloo et al., 2013 ; Sherlin et al., 2009a).

Une relation entre les marqueurs de la VFC et les capacités cognitives a été récemment décrite. Dans une méta-analyse regroupant plus de 120 études, Holzman et Bridgett (2017) ont mis en évidence qu'une VFC haute était associée à de meilleures performances exécutives. Ainsi, une augmentation de la VFC, via la pratique du VFC-RETRO, devrait se traduire par une amélioration des fonctions exécutives. En effet, 10 min de VFC-RETRO avant un événement stressant (tâche de Stroop) permet d'améliorer les temps de réaction et de diminuer les erreurs (Prinsloo et al., 2011).

Ensemble, ces études suggèrent que la pratique du VFC-RETRO est efficace pour améliorer la VFC, les performances motrices et les performances exécutives chez des individus en bonne santé. En outre, ces études soulignent qu'une session ponctuelle de VFC-RETRO peut être suffisante pour diminuer les réponses de stress. Cependant, elles présentent des limites importantes telles qu'un échantillon faible et uni-généré (n=9 par groupe, uniquement des hommes) ou une utilisation confuse de la tâche de Stroop pour induire le stress et évaluer les capacités cognitives (Prinsloo et al., 2013 ; Sherlin et al., 2009a). C'est pourquoi des investigations restent nécessaires dans le but de déterminer l'impact d'une session courte de VFC-RETRO sur les réponses de stress et les capacités cognitives.

- ❖ Les entraînements de rétrocontrôles biologiques basés sur la variabilité de la fréquence cardiaque ont des effets bénéfiques sur les marqueurs du stress
- ❖ Des interventions courtes juste avant un évènement stressant devraient être explorées
- ❖ L'impact du VFC-RETRO sur les capacités cognitives reste à déterminer

### 1.3.2.2.1.3. Impact de la VFC sur la régulation émotionnelle

De nombreuses études ont montré l'existence d'une forte relation entre VFC et émotions positives (McCraty et al., 1995; McCraty et Zayas, 2014). Mather et Thayer ont proposé que les oscillations de la fréquence cardiaque joueraient un rôle causal dans l'amélioration des processus de régulation émotionnelle (Annexe 7, Mather et Thayer, 2018). Plus précisément, les auteurs postulent que des amplitudes élevées de fréquence cardiaque influencent l'activité oscillatoire et la connectivité des régions cérébrales associées à la régulation émotionnelle (Fig. 24). Leur théorie repose sur les différents postulats et observations (Mather et Thayer, 2018) décrits ci-dessous. Certains réseaux cérébraux s'activent à des fréquences d'oscillations lentes ( $\approx 0,1$  Hertz) engendrant ainsi de courts épisodes d'activité répétés. Ces brefs épisodes d'activités cérébrales répétés peuvent renforcer la connectivité fonctionnelle au repos. Les régions cérébrales présentant un débit sanguin élevé au repos présentent également une connectivité fonctionnelle plus élevée avec d'autres régions. La respiration influence également les rythmes cérébraux et induit des oscillations synchronisées dans une grande partie du néocortex, qui varient en fonction de la phase d'oscillation. Enfin, les battements cardiaques influencent les rythmes cérébraux. En effet, les battements cardiaques provoquent des réponses EEG qui sont particulièrement importantes dans les régions du cerveau

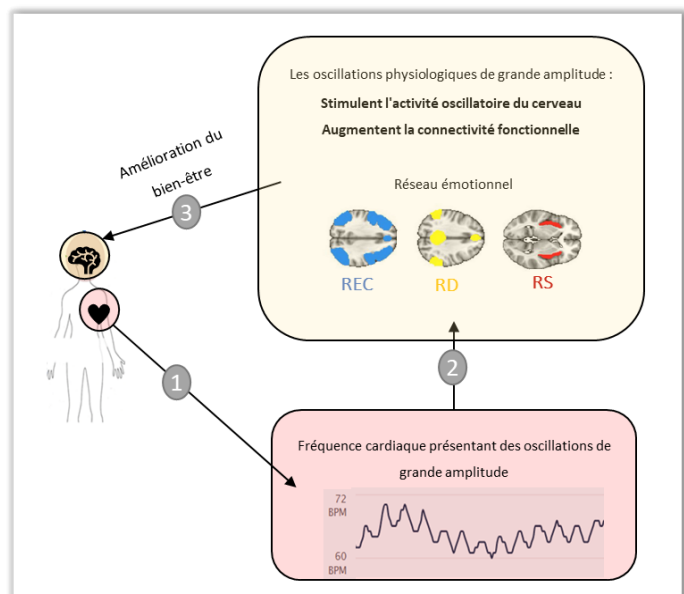


Figure 24. Relation entre oscillations cardiaques, cérébrales et émotions. (1) Oscillations de grande amplitude de la fréquence cardiaque. (2) Ces oscillations stimulent l'activité oscillatoire du cerveau et augmente la connectivité fonctionnelle des réseaux cérébraux impliqués dans la régulation émotionnelle. (3) Ces modifications de niveau d'activité se traduisent par une amélioration du bien-être émotionnel.

importantes dans les régions du cerveau

associées aux sensations et aux émotions (e.g. cortex préfrontal médian, cortex cingulaire, insula, amygdale).

### 1.3.2.3. Techniques de stimulations cérébrales

Les techniques de stimulations cérébrales ont récemment été utilisées pour diminuer les effets du stress (Subhani et al., 2018). La stimulation cérébrale regroupe différentes techniques favorisant la neuroplasticité, c'est-à-dire la propriété des structures du système nerveux à se modifier (neurogénèse, myélinisation, synaptogenèse, potentialisation long terme). La stimulation magnétique transcrânienne (SMT) ou la stimulation transcrânienne à courant continu (STCC) sont des techniques non-invasives permettant de moduler l'excitabilité de zones corticales ciblées.

La stimulation transcrânienne à courant continu est une technique non-invasive et transitoire de neuromodulation. La STCC émet un courant électrique continu de faible intensité (amplitude 1 à 2 mA), induisant à court terme des changements au niveau de l'excitabilité corticale et à long terme un renforcement des connexions synaptiques (Thair et al., 2017; Thibaut et al., 2013). Le montage classique est composé de deux électrodes fixées au niveau du cuir chevelu : une électrode active qui stimule (anode) ou inhibe (cathode) et une électrode de référence passive (Nasseri et al., 2015; Rozisky et al., 2016).

Une stimulation anodale a des effets excitateurs facilitant la dépolarisation des neurones sous-jacents, ce qui augmente la probabilité d'apparition de potentiels d'action et la potentialisation à long terme (Fig. 25, partie A). À l'inverse, une stimulation cathodale hyperpolarise les neurones, diminuant ainsi la probabilité d'apparition de potentiels d'actions (Thair et al., 2017). Enfin, la stimulation anodale facilite temporairement les fonctions sous-tendues par l'aire stimulée

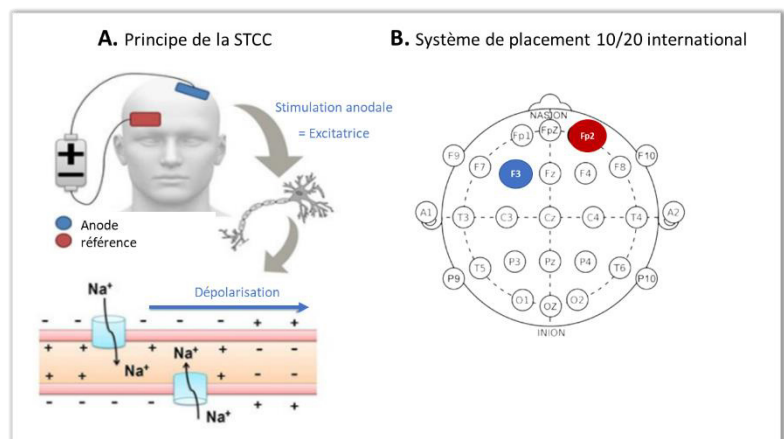


Figure 25. Stimulation anodale du cortex préfrontal gauche. (A) Cette stimulation provoque une hyperexcitabilité neuronale de la région simulée (abaissement du seuil de dépolarisation). Figure traduite et adaptée de : "Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) : Emerging Uses, Safety and Neurobiological Effects", Rozicky et al. (2015). (B) Système de placement international des électrodes (F3 : cortex préfrontal dorsolatéral gauche).

alors que la cathode induit une diminution/inhibition de celles-ci (Thibaut et al., 2013).

Avant, pendant ou après la stimulation, un ensemble de tâches cognitives, motrices, ou émotionnelles peuvent être effectuées. Les stimulations cérébrales réalisées pendant les tâches sont qualifiées d'*online*, les stimulations réalisées avant ou après les tâches sont qualifiées d'*offline* (Thair et al., 2017). La STCC a été explorée à des fins diversifiées : amélioration des apprentissages moteurs, réduction des syndromes dépressifs et de la douleur, augmentation de la créativité (Brunoni et al., 2013b; Debarnot et al., 2019; Fregni et al., 2006; Grosprêtre et al., 2021; Thibaut et al., 2013). Les zones cérébrales d'intérêts sont ciblées selon le système de nomenclature et de placement international des électrodes pour l'électroencéphalographie (Fig. 25, partie B). Parmi les zones cérébrales, des études ont ciblé le cortex préfrontal (CPF) comme site de stimulation pour investiguer les effets de la STCC sur les fonctions exécutives et la régulation émotionnelle (Dedoncker et al., 2016).

#### *1.3.2.3.1.1. Cortex préfrontal et fonctions exécutives supérieures*

Le CPF est impliqué dans le maintien des capacités cognitives orientées vers un objectif (Miller et Cohen, 2001). Un nombre conséquent d'études a montré qu'une stimulation du CPF dorsolatéral (CPFdl) permettait d'améliorer les différentes fonctions exécutives (Strobach et Antonenko, 2016)<sup>25</sup>. Plus précisément, une stimulation anodale du CPFdl (Fig. 25) permet d'améliorer la mémoire de travail, les capacités d'inhibition et la flexibilité mentale (Hoy et al., 2013; Loftus et al., 2015; Richmond et al., 2014).

L'influence de la STCC sur les tâches mnésiques a été étudiée de manière intensive. Suite à une stimulation anodale du CPFdl, une amélioration de la mémoire de travail a été largement observée (Fregni et al., 2005; Hoy et al., 2013; Ke et al., 2019; Meiron et Lavidor, 2013; Ohn et al., 2008). Une méta-analyse de 2014, regroupant 33 expériences, a montré qu'une stimulation du CPFdl, comprise entre 10 et 25 minutes, permettait d'améliorer les temps de réaction à la tâche de n-back<sup>26</sup> (Brunoni et Vanderhasselt, 2014). Même si l'influence de la STCC sur les capacités d'inhibition reste moins étudiée, les études s'accordent sur le fait qu'une stimulation anodale du CPFdl (10 à 20 min) montre une augmentation des performances à la tâche de Stroop (Jeon et Han, 2012; Loftus et al., 2015). Enfin, les effets de

---

<sup>25</sup> Pour plus de détails, voir revue de Strobach and Antonenko (2016).

<sup>26</sup> La tâche de *n-back* permet d'évaluer les capacités de mémoire de travail. Pour plus de détails, voir chapitre : impact du stress aigu : effet sur les performances.

la STCC sur la flexibilité ont été plus largement explorés chez des patients que chez des volontaires sains (Bersani et al., 2017; Soyata et al., 2018). Par exemple, chez des patients bipolaires, une STCC préfrontale excitatrice répétée a permis d'améliorer les performances au *trail making test* (Bersani et al., 2017). Chez des individus sains, la flexibilité cognitive au test de *Wisconsin* suite à une session de STCC du CPFdl est améliorée (10 min) (Mansouri et al., 2016). Ces études s'accordent sur le fait qu'une stimulation anodale courte du CPFdl permet une amélioration des processus cognitifs. Étant donné que le CPFdl est également impliqué dans les processus *top-down* de l'autorégulation émotionnelle, il est attendu que ce type de stimulation permettrait une amélioration du traitement émotionnel.

#### 1.3.2.3.1.2. *Cortex préfrontal et émotions*

Les effets d'une stimulation cérébrale du CPF ont été largement explorés chez les patients présentant des pathologies mentales associées au stress (burnout, dépression, syndrome de stress post-traumatique) (Brunoni et al., 2013c; Kan et al., 2020; Li et al., 2019; Nitsche et al., 2009; Shiozawa et al., 2014). Chez ces patients, les stimulations sont généralement appliquées sur plusieurs sessions. Cette répétition de STCC a pour vocation de créer des effets à long terme. Par exemple, Li et collaborateurs (2019) ont récemment montré qu'une dizaine de stimulations anodales du CPFdl (12 sessions, 30 min, 2mA) constituait une intervention alternative efficace pour traiter des patients pharmaco-résistants. Concernant les dépressions sévères, les stimulations durent entre 20 et 30 minutes et sont appliquées lors de sessions répétées (5 à 15 sessions). Une méta-analyse regroupant plus de 250 patients a montré qu'une stimulation anodale du CPFdl gauche permettait de diminuer les scores de dépression (Shiozawa et al., 2014).

Les effets bénéfiques des stimulations répétées sur la diminution des symptômes associés au stress sont à mettre en parallèle avec une amélioration de l'autorégulation émotionnelle. Fort de ces résultats chez les patients, les études s'intéressent aujourd'hui aux potentiels effets bénéfiques de la STCC sur la régulation émotionnelle chez des volontaires sains. Dans ces populations, les effets recherchés relèveraient plutôt d'une optimisation à court terme, c'est pourquoi la plupart des protocoles ont appliqué une seule session de STCC généralement inférieure à 30 minutes (Brunoni et al., 2013a; Carnevali et al., 2019; Gonçalves et Neves de Jesus, 2012). Ainsi, une stimulation anodale du PFCdl a permis de :

- Réduire la valence émotionnelle de stimuli négatifs, c'est-à-dire que des images émotionnelles (e.g. accidents, blessures) était jugées moins négativement (Peña-Gómez et al., 2011)
- Réduire les sécrétions de cortisol pendant le visionnage de stimuli émotionnels négatifs (Brunoni et al., 2013a)
- Augmenter le contrôle cardiaque vagal pendant le visionnage de stimuli émotionnels négatifs (Brunoni et al., 2013a)
- Diminuer les réponses de conductance cutanée face à des images négatives ou neutres (Schroeder et al., 2015).

Il a été suggéré que ces améliorations, induites par une stimulation excitatrice du CPFdl reflètent un meilleur contrôle de l'expression émotionnelle et/ou de régulation du système nerveux autonome. Plus précisément, les effets modulateurs *top-down* de la STCC anodale entraîneraient une régulation négative de l'axe HHAC et du SSAM (Brunoni et al., 2013a).

Malgré ces résultats très prometteurs, peu d'études se sont intéressées aux effets de la stimulation du CPF dans le contexte spécifique du stress (Fig. 26) (Ankri et al., 2020; Antal et al., 2014; Bogdanov et Schwabe, 2016; Carnevali et al., 2019). Antal et collaborateurs en 2014 ont montré qu'une STCC anodale du CPF médial droit, permettait de réduire les niveaux de cortisol à la suite d'un événement stressant (Antal et al., 2014). En 2019, Carnevali et collaborateurs ont exploré l'effet d'une STCC anodale sur le CPFdl (gauche), juste avant puis pendant un événement stressant. Comparativement à une stimulation SHAM (placebo), la stimulation excitatrice a :

- Réduit la fréquence cardiaque et favorisé un contrôle vagal plus important avant l'exposition au stress
- Modéré l'accélération de la fréquence cardiaque pendant l'évènement stressant
- Modéré l'activation sympathique et le retrait du parasympathique.

Le double effet bénéfique d'une stimulation excitatrice du CPF, sur les processus cognitifs d'une part et émotionnels d'autre part, ouvre des perspectives de recherche intéressantes (Fig. 26). En effet, le stress ayant un impact négatif sur les fonctions exécutives supérieures, il est possible que la STCC soit un outil pertinent pour prévenir la détérioration cognitive généralement induite par un stress. D'autre part, Bogdanov et Schwabe (2016) se sont intéressés aux effets d'une stimulation post-stress. Ils ont montré qu'une stimulation anodale



du PFCdl (droit) permettait de prévenir la détérioration de la mémoire de travail habituellement observée à la suite d'un stress. Plus récemment, Ankri et collaborateur (2020), ont cherché à caractériser les interactions entre la STCC, un stress social et la mémoire de travail chez des femmes en bonne santé. Dans leur protocole, ils ont appliqué la STCC avant le stress, puis ont testé les participantes sur une tâche de mémoire de travail. Même si leurs résultats suggèrent que la STCC affecte la mémoire de travail différemment dans les conditions contrôle et stress, ils ne permettent pas de tirer de conclusions claires (analyses bayésiennes non concluantes) (Ankri et al., 2020).

Ensemble, ces résultats soulignent qu'une stimulation anodale du CPFdl facilite la régulation émotionnelle et permettrait de limiter la détérioration cognitive induite habituellement par le stress. Bien que cette intervention offre des perspectives de recherches prometteuses, jusqu'ici les études ont appliqué la STCC soit après le stress, soit juste avant, mais aucune étude n'a, à notre connaissance, cherché à étudier son effet durant un stress d'anticipation. Une intervention préventive semble cependant optimale afin de diminuer son stress d'anticipation et de se préparer au futur événement stressant.

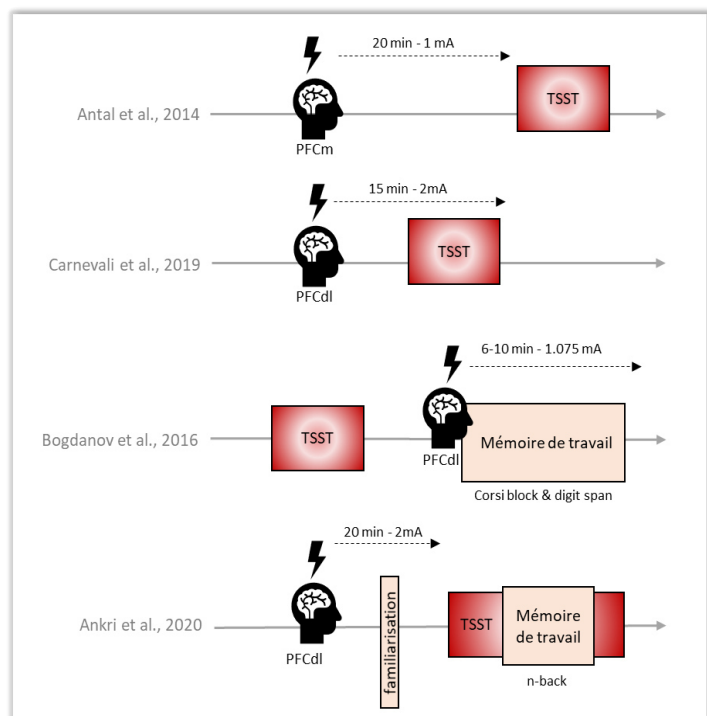


Figure 26. Protocoles expérimentaux existants issus des différentes études s'intéressant aux interactions entre la stimulation transcrânienne à courant continu, le stress, et les capacités cognitives. TSST : Trier Social Stress Test.

La stimulation transcrânienne à courant continu anodale du CPFdl :

- ❖ Permet d'améliorer les fonctions exécutives supérieures
- ❖ Permet d'améliorer les symptômes dépressifs
- ❖ Permet d'améliorer le contrôle de l'expression émotionnelle

L'impact aigu de cette technique dans le domaine du stress reste à définir

#### 1.4. Modérateurs individuels du stress : traits psychologiques

La littérature décrit des différences inter- et intra-individuelles sur la façon de réagir aux stressseurs. Il a été proposé que la meilleure façon de conceptualiser le stress est d'invoquer une interaction dynamique entre l'environnement et la personne. Les individus peuvent être caractérisés par leurs profils physiologiques (e.g. sexe, cycle hormonal), leurs expériences individuelles, ou encore leurs caractéristiques psychologiques (Lazarus, 1999). Certains facteurs vont être plus enclins à varier rapidement comme par exemple la phase du cycle menstruel ou l'expérience individuelle <sup>27</sup>, alors que d'autres modérateurs sont plus stables dans le temps tels que les traits de personnalité. Pour une même situation stressante, ces facteurs vont interagir entre eux et avec l'environnement pour induire des réponses psychophysiologiques variées.

Certaines différences psychologiques individuelles relativement stables sont impliquées dans la prédisposition au stress. Ces caractéristiques stables dans le temps sont décrites par la notion de « trait » et viennent s'opposer à des réponses instantanées. Ces dernières sont alors dépendantes du contexte immédiat et sont appelées « états ». Selon leur trait d'anxiété, leur personnalité, ou encore leur peur de l'évaluation négative, les individus seront plus ou moins sensibles aux événements stressants. De nombreuses études ont montré une forte interaction entre le niveau d'anxiété d'un individu et une sensibilité exacerbée aux stressseurs (Ebstrup et al., 2011; Evain et al., 2017). L'anxiété est caractérisée par des sentiments subjectifs de tension, d'appréhension, de nervosité et d'inquiétude. Le niveau d'anxiété peut être mesuré par le questionnaire *State-Trait Anxiety Inventory* (STAI-T) qui reflète, de façon globale et relativement stable dans le temps, la tendance à l'anxiété chez les individus (i.e. anxiété-trait). Les personnes présentant un niveau d'anxiété-trait élevé sont également susceptibles de présenter des niveaux d'anxiété-état élevés dans des situations menaçantes pour l'estime de soi (Evain et al., 2017). Certaines sous-dimensions de l'anxiété sont davantage impliquées dans la réponse de stress dans un contexte d'évaluation sociale, comme la peur de l'évaluation négative. Le questionnaire de peur de l'évaluation négative (PEN) permet d'estimer le niveau d'anxiété socio-évaluative qui est un trait assez stable dans le temps. Le questionnaire de PEN comporte 30 items (Annexe 8). Plus le score obtenu est élevé, plus

---

<sup>27</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : les modérateurs de l'axe HHAC.

l'anxiété socio-évaluative est grande (score de 0 à 30 : bas si  $\leq 8$ , élevé si  $\geq 20$ ). Cet outil permet de mesurer l'appréhension du jugement des autres et la détresse provoquée lors d'une appréciation négative (Musa et al., 2004). La crainte excessive d'une évaluation négative de la part d'autrui est un élément central dans la vulnérabilité à l'anxiété sociale. Cette crainte peut laisser surgir un biais attentionnel dans le traitement de l'information, les sujets anxieux sociaux partageant leur attention entre les représentations internes sociales et les indices externes pris comme signes d'un jugement.

#### 1.4.1. Personnalité, big-five et stress

La personnalité interagit avec l'évaluation cognitive de l'événement, elle a donc été proposée comme un facteur prédictif important de la réponse au stress (Schneider, 2004; Schneider et al., 2012; Soliemanifar et al., 2018). Le questionnaire des 5 grands traits (Big Five Inventory) est le plus utilisé à ce jour, il est traduit et validé dans de nombreuses langues dont le Français (Annexe 9, BFI-fr ; Plaisant et al., 2010). Il permet de caractériser les individus en 5 traits de personnalité : ouverture aux expériences, caractère consciencieux, extraversion, caractère agréable, et névrosisme (Digman, 1990; McCrae et Costa, 1987).

Le trait d'ouverture aux expériences décrit l'attrait des individus pour la nouveauté et les nouvelles expériences. Les personnes avec des scores élevés à ce trait sont perspicaces, imaginatives, et multiplient les centres d'intérêts. Dans un contexte de stress, l'ouverture aux expériences prédit une plus grande résilience (Williams et al., 2009). Durant un événement stressant, des scores d'ouverture aux expériences élevés sont associés à des réactivités cardiaques et des sécrétions en cortisol plus faibles (Bibbey et al., 2013; Xin et al., 2017).

Le caractère consciencieux décrit les caractéristiques de fiabilité, de ponctualité et d'organisation des individus. Les personnes présentant des niveaux élevés de caractère consciencieux sont méthodiques et rigoureuses. Le caractère consciencieux a été associé à une réponse accrue du cortisol au stress par certaines études, mais cela n'a pas été démontré de manière systématique (Bibbey et al., 2013; Soliemanifar et al., 2018).

Les individus présentant un niveau élevé d'extraversion sont dynamiques, loquaces et assertifs. Comparativement aux personnes introverties, les extraverties présentent des réactivités cardiovasculaires et des sécrétions en cortisol plus faibles durant un événement stressant (Jonassaint et al., 2009; Xin et al., 2017).

Les individus présentant des hauts niveaux d'agréabilité sont amicaux, coopérants et doués de compassion. Les sujets agréables sont affectueux, gentils et sympathiques. Lors d'un événement stressant, plus les individus ont un score d'agréabilité élevé, moins ils ont des réactions cardiaques et de cortisol élevées (Bibbey et al., 2013).

Les personnes ayant un score élevé de névrosisme présentent une certaine instabilité émotionnelle et ont tendance à ressentir des émotions négatives. Ainsi, ce trait de personnalité caractérise une tension interne et une humeur changeante. La relation entre le névrosisme et la réactivité physiologique au stress est mitigée. Alors que le névrosisme est systématiquement impliqué dans une augmentation des émotions négatives lors d'une situation stressante, les réponses physiologiques sont moins unanimes (Soliemanifar et al., 2018). Certaines études montrent une fréquence cardiaque et une réactivité au cortisol plus faibles chez les individus présentant des traits de névrosisme élevés alors que d'autres montrent l'inverse, voir aucun impact (Bibbey et al., 2013; Soliemanifar et al., 2018; Xin et al., 2017). Une étude récente en neurophysiologie a montré que le névrosisme prédisait l'augmentation du niveau d'activité de l'amygdale face à des stimuli de menaces (Everaerd et al., 2015). Les différences de relations entre névrosisme et réponses psychophysologiques du stress peuvent également venir de la nature du stresser (Jonassaint et al., 2009).

Les réponses de stress sont composées de différentes périodes telles que des phases de préparation, de réponse de stress aigu, ou encore de récupération <sup>28</sup>. Étant donné que la personnalité interagit avec l'évaluation cognitive de l'événement et que l'évaluation cognitive est un processus dynamique, il est attendu que la personnalité interagisse étroitement lors de toutes les périodes du stress et notamment avec la mise en place et l'efficacité des stratégies de coping (Schneider, 2004; Schneider et al., 2012; Soliemanifar et al., 2018).

#### 1.4.2. Personnalité et stratégies de coping

Les traits de personnalité peuvent expliquer à la fois l'adhésion et l'efficacité des méthodes d'adaptations au stress (Penley et Tomaka, 2002; Puloopulos et al., 2019). Des études antérieures ont montré que la personnalité modère l'efficacité de diverses méthodes d'adaptation telles que le rétrocontrôle biologique basé sur la fréquence cardiaque et électrodermale, la stimulation cérébrale, la relaxation musculaire, ou encore la méditation

---

<sup>28</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : anticipation, stress et récupération.

pleine conscience (Nyklíček et Irrmischer, 2017; Pardine et Napoli, 1977; Peciulienė et al., 2015; Peña-Gómez et al., 2011). Quatre séances de rétrocontrôle biologique basées sur la fréquence cardiaque sont associées à une augmentation plus importante de la conductance cutanée chez les personnes ayant des scores plus élevés d'ouverture, d'agréabilité et de caractère consciencieux. Le même entraînement induit au contraire une diminution de la fréquence cardiaque chez les personnes ayant des niveaux de névrosisme et d'extraversion élevés (Peciulienė et al., 2015). L'étude de Peña-Gomez et collaborateurs (2011) montre que les individus en bonne santé présentant un faible niveau d'extraversion tirent plus de bénéfices d'une technique de stimulation cérébrale appliquée pour une régulation émotionnelle (e.g. ils jugent des stimuli comme ayant une valence émotionnelle moins négative que leurs homologues) (Peña-Gómez et al., 2011). Ainsi, l'efficacité de la préparation à un événement stressant sera un processus dynamique d'interaction entre la personnalité et les stratégies mises en place.

## 1.5. Contexte écologique : stress et professionnels de santé

Les spécialités médicales à haut risque qui doivent faire face à des situations stressantes régulières, comme les urgences, l'anesthésie-réanimation, la chirurgie ou l'obstétrique, exposent de facto leurs praticiens à un stress chronique. En l'absence d'une prise en charge adéquate, l'accumulation de ces situations peut rapidement devenir problématique. Les effets du stress chronique s'expriment à différents niveaux, avec des symptômes allant du trouble du sommeil à l'épuisement professionnel <sup>29</sup>.

### 1.5.1. Stress chez les professionnels de santé

Les professionnels de santé impliqués dans les services d'urgences et de soins intensifs éprouvent régulièrement des réponses de stress aigu (Isbell et al., 2020; Leblanc, 2009). Les causes de stress en milieu hospitalier sont nombreuses. Parmi elles, on retrouve la prise en charge de situations critiques où l'état des patients se dégrade brutalement, ou encore une dette de sommeil importante provoquée par l'accumulation des heures de travail. Les praticiens anesthésistes-réanimateurs travaillent en situations de prise en charge de patients en conditions critiques, ces situations nécessitent une activité cognitive importante malgré une surcharge émotionnelle. De ce fait l'anesthésie-réanimation est reconnue comme l'une des spécialités médicales les plus stressantes (Gurman et al., 2012). Chez les anesthésistes réanimateurs, les sources de stress sont liées directement à leur pratique clinique spécifique (proximité de la mort, management de l'anesthésie et de la réanimation aux âges extrêmes de la vie, peur de l'erreur médicale) et également liées à l'environnement de travail avec des stressseurs physiques (pollution sonore et visuelle via les multiples signaux paramétriques à surveiller et les alarmes) et psychologiques (climat d'exigences et de rapidité, relations parfois conflictuelles avec les collaborateurs). Il est important de souligner que cette liste de stressseurs quotidiens a été grandement allongée par le contexte sanitaire d'épidémie mondiale de la COVID-19 (surcharge de travail, manque de matériel et humain, fluctuation intensifiée, planification de travail modifiée, accentuation des gestes barrières et des mesures de protections) (Margolis et al., 2021; Rekatsina et al., 2020).

---

<sup>29</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : impact du stress chronique : effets sur la santé.

### 1.5.2. Conséquences du stress chez les professionnels de santé

Les conséquences du stress chez les professionnels de santé sont multiples et de gravité variable. Le stress aigu peut être associé à une détérioration de leurs performances immédiates, ce qui impacte la qualité de la prise en charge du patient (Firth-Cozens et Greenhalgh, 1997; Leblanc, 2009). Lorsque le stress est vécu de manière répétée, ses effets sur la santé mentale des professionnels de santé ainsi que le niveau de satisfaction des patients sont conséquents (Hawryluck et Brindley, 2018; Panagioti et al., 2018; Sanfilippo et al., 2017; Van Der Wal et al., 2018).

**Les conséquences sur la prise en charge des patients.** Les situations de soins critiques font appel à des fonctions exécutives supérieures (mémoire de travail, restitution mnésique, attention, prise de décisions) qui peuvent être altérées par des niveaux de stress élevés (Leblanc, 2009). Plus particulièrement, le stress aigu diminue les capacités mnésiques et la flexibilité mentale, ce qui peut altérer le raisonnement et la prise de décisions (Shields et al., 2016). Ainsi en situation de stress, les raisonnements hypothético-déductifs nécessitant de la flexibilité, peuvent être laissés de côté au profit de raisonnements par analogie, plus rapides mais aussi plus à risques d'erreurs cognitives. Selon le modèle théorique du contrôle attentionnel, le stress aigu focalise les ressources attentionnelles de l'individu sur la source du stress (Vine et al., 2016), ces modifications de l'attention pouvant altérer les capacités à distinguer les informations pertinentes nécessaires au bon raisonnement clinique.

**Les conséquences sur le bien-être et la santé des professionnels.** Le stress peut engendrer une insatisfaction professionnelle, un repli sur soi, ainsi qu'un épuisement émotionnel pouvant mener vers une incapacité de travail (Firth-Cozens et Greenhalgh, 1997; Sanfilippo et al., 2017). L'accumulation importante de stress génère des difficultés psychologiques, telles que des problèmes d'apathie, une perte d'énergie, et dans des cas avancés un syndrome d'épuisement professionnel (*burnout*) et/ou dépressif avec des risques suicidaires (Dutheil et al., 2019; Sanfilippo et al., 2017). Chez les anesthésistes-réanimateurs, l'épuisement professionnel peut s'élever jusqu'à 40%, ces professionnels étant à plus haut risque de tentatives de suicide que leurs homologues d'autres spécialités (Sanfilippo et al., 2017; Van Der Wal et al., 2018). De plus, ces conditions néfastes peuvent conduire à la mise en place de comportements compensatoires inadaptés, voire dangereux (dévalorisation, conduite

addictive, drogue récréative, tabagisme, alcoolisme) (Grunberg et al., 2010). Dans ces populations particulièrement confrontées au stress il semble de première importance de déterminer des stratégies de coping efficaces et de chercher à les implémenter le plus tôt possible dans les cursus de formation.

- ❖ Les anesthésistes réanimateurs subissent des niveaux élevés et récurrents de stress professionnel
- ❖ Ce stress induit des conséquences immédiates sur leur bien-être et la qualité de leur prise en charge
- ❖ Ce stress a des conséquences à long terme telles que le syndrome d'épuisement professionnel

### 1.5.3. Étudiants en santé

**Des étudiants en détresse ?** Les professionnels de santé diplômés ne sont pas les seuls à souffrir du stress. Les études de médecine, en raison de leur nature compétitive et des évaluations constantes et particulièrement sélectives, font partie des cursus de formations longues les plus anxiogènes (Abdulghani, 2008; Qamar Khadija et al., 2015). En conséquence, de nombreux étudiants souffrent d'anxiété, de troubles du sommeil, de symptômes dépressifs, et de burnout (Almojali et al., 2017; Cornwell et al., 2004; Ishak et al., 2013; Moutinho et al., 2017; Saravanan and Wilks, 2014; Sherina et al., 2004). Selon certaines estimations alarmantes, au moins la moitié des étudiants en médecine pourraient être affectés par le stress et le burnout (Ishak et al., 2013). Ces difficultés rendent l'apprentissage du métier de soignant encore plus difficile. Dans ces conditions, il paraît indispensable que ces étudiants puissent bénéficier de techniques de contrôle émotionnel afin d'améliorer leur qualité de vie, de renforcer leur efficacité lors du travail quotidien et de prévenir l'occurrence des maladies liées au stress chronique.

**Des solutions possibles ?** À partir des constats précédemment décrits, il est essentiel de proposer des techniques de contrôle émotionnel le plus précocement possible dans les cursus de formation médicale (Ignacio et al., 2016). Une étude récente souligne l'utilité d'un temps d'échange sur les thématiques du stress chez des étudiants en médecine (Manning-Geist et al., 2020). Cette étude montre des effets positifs immédiats d'un temps d'échange structuré sur les niveaux de connaissance, de confiance, et de compétence des étudiants. Cependant, ces améliorations immédiates ne perdurent pas dans le temps (re-test à 3 mois). Nous



supposons que l'expérimentation personnelle de techniques de gestion émotionnelle permettrait de faciliter la sensibilisation des étudiants aux techniques de gestion du stress. La démonstration de l'efficacité de ces approches durant un exercice clinique stressant permettrait d'augmenter l'adhésion immédiate et future des étudiants en médecine. L'apprentissage de techniques émotionnelles semble de première nécessité, du point de vue du développement individuel, et plus généralement dans l'intérêt d'une amélioration globale médico-économique.

#### 1.5.4. Simulation haute-fidélité en santé

La simulation haute-fidélité en santé est un exercice simulé dans un haut niveau de réalisme (Fig. 27) qui permet de mettre en scène des situations cliniques variées (Goldberg et al., 2015). Ces simulations peuvent revêtir plusieurs formes, de la simulation d'un simple acte médical (i.e. simulation procédurale) à une situation de gestion de crise inédite (Bajunaid et al., 2017; Ghazali et al., 2018). Le réalisme de la situation simulée force l'apprenant à se comporter comme s'il était face à une situation réelle. Ce réalisme repose sur quatre composantes principales : temporelle, physique, conceptuelle (cohérence globale des informations disponibles), et émotionnelle (corrélation forte entre l'émotion perçue en simulation et celle perçue in situ). La simulation haute-fidélité permet ainsi un engagement poussé des apprenants par l'immersion. Elle est devenue une méthode incontournable dans l'enseignement des soins de santé, et plus particulièrement dans les disciplines de soins critiques avec fort impact de coopération interdisciplinaire et interprofessionnelle (e.g.

anesthésie-réanimation, médecine d'urgence) (Lilot, 2019). Il existe aujourd'hui des preuves robustes de son efficacité dans l'amélioration de l'acquisition des connaissances et compétences, ainsi que dans l'induction de changements de comportement et l'amélioration du devenir des patients réels (Barsuk et al., 2009; Cohen et al., 2010; Cook et al., 2011; El Khamali et al., 2018; Siassakos et al., 2009).



Figure 27. Exemple de patient simulé au Centre Lyonnais d'Enseignement par la Simulation en Santé (CLESS). Les séances de simulation haute-fidélité en santé sont organisées en trois grandes étapes : le briefing du scénario, la participation active d'un étudiant sur le scénario, puis le debriefing du scénario dirigé par des formateurs spécialisés. Crédit photo. Lucas Denoyel, <http://cless.univ-lyon1.fr/webapp/website/website.html?pid=3735082&pageId=274560>.

### 1.5.5. Simulation haute-fidélité et stress

Bien qu'un grand soin soit apporté à la bienveillance pédagogique et la confidentialité, la simulation haute-fidélité reste une source de stress et d'anxiété non négligeable pour les étudiants (Evain et al., 2017; Ghazali et al., 2018; Ignacio et al., 2016). Les scénarii revêtant un caractère imprévisible et/ou incontrôlable sont généralement générateurs de hauts niveaux de stress. Les situations critiques avec des patients qui se détériorent rapidement, le réalisme de l'environnement, la peur de la mise en échec, ou encore l'appréhension d'être observé et jugé, sont des exemples de facteurs stressants (Nielsen et Harder, 2013). Ce stress généré en simulation peut être conforme à la pratique clinique réelle lorsqu'il s'agit d'une situation critique (Dias et Neto, 2016). La simulation haute-fidélité offre donc l'opportunité *i)* de comprendre l'influence du stress sur les performances des apprenants et *ii)* d'explorer des stratégies de gestion du stress.

### 1.5.6. Simulation haute-fidélité et performance

Durant les scénarii de haute-fidélité, les apprenants sont amenés à mobiliser leurs connaissances théoriques, leurs compétences techniques et leurs habiletés à la gestion de crise. La littérature sur les effets du stress aigu sur les performances cliniques en situation de crise, simulée ou réelle, reste cependant assez pauvre et hétérogène (Harvey et al., 2012; Krage et al., 2017, 2014; Leblanc et al., 2012). Le stress et les performances ont probablement des interactions complexes et multifactorielles. En effet, certaines études rapportent une amélioration (DeMaria et al., 2010), alors que d'autres montrent une baisse des performances en cas de stress (Harvey et al., 2012; Krage et al., 2017, 2014; Leblanc et al., 2012). Dans ce contexte, il convient de préciser que la notion de performances en simulation est multifactorielle mais aussi temporelle. Les performances induites par les simulations peuvent être :

- Immédiates : connaissances théoriques et techniques que les apprenants ont réussi à mettre en place pendant la situation de crise stressante (Bajunaid et al., 2017; Sigwalt et al., 2020)
- À long terme sur l'apprentissage : points clés théoriques et techniques que les apprenants ont retenu à la suite de la simulation et sont capables de retranscrire ou d'effectuer à nouveau en simulation (Goldberg et al., 2015; Lilot et al., 2018)

- À long terme sur la pratique clinique : connaissances acquises en simulation observées par la suite en pratique clinique réelle (Barsuk et al., 2009; Cohen et al., 2010; Siassakos et al., 2009)

Concernant les performances immédiates, les effets du stress aigu sur les performances techniques sont majoritairement délétères (Bajunaid et al., 2017; Krage et al., 2014). Bajunaid et collaborateurs (2017) ont montré qu'un stress aigu diminuait la performance psychomotrice durant une tâche de résection d'une tumeur simulée. Ces données confirment celles obtenues in situ sur l'impact délétère du stress sur les performances chirurgicales (Arora et al., 2010). Comparativement à un groupe contrôle, l'addition de stressseurs externes physiques (bruits) et psychologiques (membre de la famille du patient) conduit à une détérioration de la prise en charge technique et non technique de l'arrêt cardiovasculaire (Krage et al., 2017, 2014).

**Mesurer la performance en simulation haute-fidélité.** Les performances cliniques peuvent aussi être évaluées en simulation haute-fidélité. Concernant les performances cliniques « techniques », des listes d'actions attendues pour résoudre spécifiquement le problème présenté par le scénario sont régulièrement relevées (Evain et al., 2019; Sigwalt et al., 2020). Chaque action attendue, comme par exemple la vérification de présence de nausées/vomissements chez le patient, correspond à un item. Cette action est ensuite classée et notée en fonction de trois catégories de réalisation (exécution spontanée : 2, facilitée : 1, explicite ou non réalisée : 0) (Annexe 10). Les habiletés nécessaires à une bonne prise en charge des patients regroupent également des performances dites « non techniques ». Ces dernières correspondent aux capacités de communication avec l'équipe, aux positionnements de leadership, à la coordination, à la conscience situationnelle, à l'utilisation des ressources disponibles et à la capacité de résoudre le problème. Des outils globaux non spécifiques ont été développés et utilisés à des fins de standardisation pour la recherche (*Anaesthetist Non-Technical Skills*, ou *Team scale, Ottawa*, Annexe 11) (Cooper et al., 2016; Flin et al., 2008; Kim et al., 2006).

### 1.5.7. Gestion du stress en simulation

En contexte de simulation, les études les plus récentes s'intéressent aux effets induits par des techniques de gestions émotionnelles sur les performances immédiates des apprenants (Ignacio et al., 2016; Lilot et al., 2018; Sigwalt et al., 2020).

**Les Techniques d'Optimisation du Potentiel (TOP).** Depuis le début des années 1990, des techniques de formation dans le milieu militaire sont enseignées afin d'améliorer la gestion du stress dans des situations jugées critiques qui nécessitent des décisions rapides et sécurisées (Trousselard et al., 2015). Ces techniques ont été regroupées sous le nom de Techniques d'Optimisation du Potentiel et sont constituées d'un ensemble d'outils, de procédés et de stratégies mentales qui permettent d'optimiser les ressources psychocognitives, physiologiques et comportementales en fonction des exigences de la situation critique présentée (Perreaut-Pierre, 2016). Ces outils comprennent l'imagerie mentale et la projection du succès, la respiration, la relaxation, le dialogue interne, et la pré-activation mentale. Les TOP sont aujourd'hui explorées dans le domaine médical concernant la prise en charge du stress et l'amélioration des performances (Sigwalt et al., 2020). Dans un contexte de simulation haute-fidélité, une formation TOP a permis une réduction du stress physiologique ; avec une diminution du pic d'activité orthosympathique lors du scénario de simulation de crise (Claverie et al., 2020). Cette même formation a également permis une amélioration des performances durant la gestion de scénarii de soins critiques (Sigwalt et al., 2020).

**Entraînement régulier et pratique ponctuelle.** Les techniques de gestion du stress qui ont permis une amélioration des performances en simulation reposent sur des protocoles de formation impliquant une pratique fréquente et régulière (Bouchard et al., 2012; Sigwalt et al., 2020). Par exemple, la formation TOP en simulation haute-fidélité nécessite l'acquisition d'outils spécifiques obtenus sur un programme réparti sur cinq semaines. Comparativement à un groupe contrôle, Sigwalt et collaborateurs ont montré que la formation TOP permettait une plus grande performance durant la gestion de scénario de soins critiques stressants (Sigwalt et al., 2020). Cependant, une formation longue impliquant des exercices réguliers présente des limites importantes. En effet, l'adhésion et la fréquence de la pratique peuvent être très hétérogènes d'un individu à l'autre. De plus, l'apprentissage reste exigeant en termes

de ressources matérielles, humaines, et temporelles. Pour ces raisons, l'exploration de techniques de gestion émotionnelle simples d'utilisation et rapides de mise en place pourrait faciliter grandement leurs utilisations appropriées.

- ❖ Les étudiants en santé sont particulièrement touchés par le stress et l'anxiété
- ❖ Le besoin d'apprentissage précoce de stratégies de gestion émotionnelle semble essentiel dans le cursus médical
- ❖ Les simulations en santé représentent un contexte idéal pour déterminer l'efficacité des interventions sans risque pour les patients
- ❖ L'expérimentation de stratégies de gestion du stress courtes pourrait présenter des avantages en termes d'adhésion et de facilité de mise en place

## 2. Cadre expérimental

Nous venons de voir que le stress survient lorsque les exigences d'une situation dépassent la capacité d'adaptation individuelle. Le stress engendre de nombreux effets délétères sur la performance et la santé, cet impact néfaste soulignant la nécessité d'explorer des techniques de remédiation. Dans ce contexte, nos études cherchent à mieux caractériser quand, comment, et pourquoi le stress apparaît. Notre approche pluridisciplinaire met en avant les impacts et les moyens de remédiation du stress, tout en considérant l'influence de caractéristiques individuelles. Le premier objectif de ces travaux de thèse est de déterminer l'impact d'un stress aigu sur une tâche cognitivo-motrice (études 1, 2). Le second objectif est de caractériser la période d'anticipation (études 3, 4, 5, 6). Le troisième est d'explorer des techniques de remédiation du stress aigu, à la fois au sein d'études de laboratoire (études 3, 4) et dans un contexte plus écologique de stress professionnel (études 5, 6). Enfin, le dernier objectif est d'évaluer l'impact des traits de personnalité sur la sensibilité et la résilience au stress (étude 7).

### 2.1. Caractériser les effets du stress aigu sur des tâches cognitivo-motrices

#### 2.1.1. Imagerie motrice : définition et moyens de mesures

L'imagerie motrice consiste à se représenter mentalement un mouvement sans exécution physique concomitante (Jeannerod, 1994). La représentation mentale du mouvement se construit sur les modalités sensorielles, dont les deux principales sont les modalités visuelle (visualiser son mouvement) et kinesthésique (percevoir son mouvement)

<sup>30</sup>. L'imagerie motrice, puisqu'elle consiste en une activité mentale de simulation du mouvement, est considérée comme une tâche cognitivo-motrice (Glover et al., 2020; O'Shea et Moran, 2017). Un entraînement par imagerie motrice contribue à favoriser l'apprentissage, améliorer la gestuelle, ou encore à moduler la vitesse d'exécution du mouvement réel (Guillot et Collet, 2010; Malouin et al., 2013). L'imagerie motrice va activer de nombreuses régions cérébrales analogues à celles de l'exécution réelle du mouvement et induire une plasticité cérébrale comparable. Cette équivalence neurofonctionnelle expliquerait, tout au moins en partie, l'efficacité de l'imagerie motrice (Hanakawa et al., 2008; Héту et al., 2013; Jackson et al., 2003; Lacourse et al., 2005).

L'imagerie motrice est utilisée dans de nombreuses situations de la vie quotidienne et plus particulièrement dans les contextes sportif ou médical. Dans le milieu sportif, l'imagerie motrice est souvent utilisée en amont, pendant, ou juste après l'exécution d'un ou d'une séquence de mouvements (Beauchamp et al., 2002; Guillot et Collet, 2008). La réalisation de l'imagerie motrice juste avant le mouvement, permet de se préparer et de faciliter son exécution correcte. Lorsque le travail mental est effectué à l'entraînement, sa proximité avec le mouvement réel permet d'utiliser une forme de préparation mentale intégrée ayant pour objectif de cibler les éléments techniques du geste. Lorsque l'imagerie est réalisée en compétition, juste avant l'exécution réelle, elle est intégrée dans une routine de pré-performance, dont l'objectif est d'augmenter la confiance et de mettre le sportif dans les meilleures dispositions. Dans ce cas, le travail de visualisation mentale est principalement orienté sur la réussite. En aval de l'exécution du mouvement, l'imagerie peut faciliter l'ancrage d'un mouvement correctement exécuté, permettre l'identification des causes de l'échec, ou encore recréer mentalement un mouvement corrigé. Dans le milieu médical, l'imagerie est souvent utilisée en session répétée, de manière adjonctive ou en complément du programme de rééducation. Elle est utilisée dans le but d'aider le recouvrement d'une gestuelle affectée

---

<sup>30</sup> Voici un exemple concret de pratique de l'imagerie motrice explicite :

1) Réalisez un mouvement de fermeture de la main. Démarrez main ouverte doigts tendus, pour finir en position poing serré (réalisez cet exercice yeux ouverts, regardez votre main et faites attention aux sensations associées).

2) Fermez vos yeux maintenant et, sans bouger physiquement, réalisez le même mouvement mentalement. Lors de l'imagerie visuelle, vous verrez mentalement vos doigts tendus, puis pliés, puis vous ne verrez plus vos doigts (peut-être visualisez-vous votre pouce). Pour l'imagerie kinesthésique et tactile, vous percevrez les tensions dans les articulations de vos doigts lorsqu'ils se plient, puis vous sentirez vos ongles dans votre poing.

par une lésion centrale ou périphérique, ou bien afin de limiter la perte de force après une opération chirurgicale.

L'imagerie motrice est pratiquée implicitement ou explicitement. L'imagerie implicite implique des processus de création automatique de certains mouvements mentaux. Le paradigme le plus utilisé pour tester la capacité implicite/involontaire d'imagerie motrice est celui de jugement de latéralité (Berneiser et al., 2018; Osuagwu et Vuckovic, 2014; Parsons et al., 1995). Dans ces tâches, un stimulus comme par exemple une main va être présenté à l'écran dans différentes orientations, afin de définir la latéralité du stimulus. Bien que la consigne soit de répondre et laisse la possibilité à l'individu de trouver n'importe quelle stratégie l'amenant à répondre, il est fréquent que le participant forme spontanément une image mentale de main puis la tourne. Lors d'une imagerie motrice explicite, l'individu génère de manière consciente et en réponse à des consignes précises les images mentales du mouvement selon les modalités sensorielles visuelle et kinesthésique. L'expérimentateur donne des instructions détaillées sur la réalisation du travail mental. Par exemple, durant des tâches de séquences de mouvement de pointage avec le membre supérieur, il est demandé au participant de visualiser mentalement son doigt et/ou de percevoir les mouvements dans ses doigts ou son poignet.

L'accès au travail mental reste, cependant, un véritable challenge pour les expérimentateurs. A ce jour, différents outils ont été élaborés et utilisés afin d'évaluer les capacités d'imagerie motrice. Ces outils se classent en trois grandes catégories : subjective, semi-objective et objective. Parmi les outils subjectifs, nous retrouvons les questionnaires d'autoévaluations tels que les *Movement Imagery Questionnaires (MIQ-R, MIQ-3)*, le *Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ)* qui est davantage utilisé dans les études cliniques, mais aussi des échelles de Likert ou des échelles visuelles analogues (Collet et al., 2011; Hall et Martin, 1997; Malouin et al., 2007; Mateo et al., 2018; Roberts et al., 2008; Williams et al., 2012). Pour les populations saines, le *MIQ-R* fait partie des questionnaires les plus fréquemment utilisés (Annexe 12). Il permet d'évaluer les capacités générales d'imagerie motrice explicite impliquant différentes parties du corps, dont des mouvements du corps entier (e.g. mouvement de saut avec bras en élévation). Ce questionnaire permet également de distinguer les capacités individuelles d'imagerie selon les modalités visuelle et kinesthésique. Afin d'évaluer la qualité du travail d'imagerie lors d'une tâche spécifique, les études utilisent

des échelles de Likert ou des échelles analogiques visuelles pour déterminer la clarté, la vivacité, ou encore la difficulté de l'image mentale formée. Des outils d'évaluation qualitative, tels que les entretiens semi-dirigés peuvent également être mis en place pour questionner sur la manière dont l'individu a réalisé l'exercice d'imagerie motrice (Moran et MacIntyre, 1998). Ces approches restent intéressantes et riches d'enseignement, malgré la difficulté de la verbalisation d'une action qui relève d'une mémoire procédurale, par définition difficilement traduisible par le langage. Nous proposons que les entretiens d'explicitations, qui permettent de questionner et fragmenter finement le vécu du travail mental (e.g. décomposition de l'action), offrent un nouvel outil pertinent afin de déterminer les stratégies individuelles de pratique de l'imagerie motrice (Vermesch, 2019). Les outils semi-objectifs comprennent des données comportementales (e.g. temps de réalisation, nombre d'erreurs dans le cas d'une tâche implicite). Les paradigmes de chronométrie mentale ont été largement utilisés pour évaluer la capacité à préserver les caractéristiques temporelles du mouvement (Debarnot et al., 2012; Gueugneau et al., 2009). En l'absence d'instructions spécifiques, la durée d'un mouvement mental devrait être équivalente à celle du mouvement physique correspondant, selon le principe de congruence temporelle (Guillot et al., 2012). Cette congruence, appelée aussi isochronie, a été proposée comme l'un des marqueurs principaux de qualité de l'imagerie motrice (Guillot et al., 2012). Toute surestimation ou sous-estimation de la durée réelle du mouvement lors du travail mental, pourrait ainsi révéler une difficulté liée à la formation des images, bien que de nombreux facteurs externes perturbent la capacité à obtenir cette congruence temporelle et doivent donc être considérés dans l'équation et l'interprétation des données recueillies (Guillot et Collet, 2005; Guillot et al., 2012).

L'imagerie est un travail mental qui nécessite une attention élevée et un niveau d'activation comparable à la réalisation d'un mouvement réel. Les modifications du niveau d'attention au cours du travail d'imagerie sont détectables par des marqueurs neurophysiologiques tels que les niveaux d'activations cérébrales (mesurables par PET, EEG, fMRI), l'arythmie sinusale respiratoire, la conductance cutanée ou encore les mouvements oculaires (Collet et al., 2011; Heremans et al., 2008; Héту et al., 2013; Poiroux et al., 2015). Lors d'un travail mental, le système sympathique s'active et stimule la sécrétion de sueur par les glandes sudoripares sur les surfaces palmaires, augmentant ainsi la conductance cutanée. Collet et collaborateurs (2011) ont proposé que l'analyse des enregistrements d'activité



électrodermale permettait d'objectiver le travail d'imagerie motrice. Le signal électrodermal est composé de deux états : tonique et phasique. L'activité tonique renseigne sur l'éveil physiologique et donc la capacité du sujet à s'activer ou maintenir un éveil suffisamment élevé pendant le travail mental. L'activité phasique, par le biais des réponses physiologiques corrélatives de l'imagerie, marque l'engagement de l'individu dans une tâche cognitive et renseigne, indirectement, sur la qualité du travail mental effectué. Un maintien du niveau d'éveil durant la répétition d'essais d'imagerie est nécessaire pour réaliser un traitement cognitif efficace (Collet et al., 2011) (Fig. 28, partie A). Enfin, l'étude du comportement oculomoteur, quoique moins fréquente, semble offrir un autre moyen d'évaluer objectivement les capacités d'imagerie motrice (Heremans et al., 2008; Lanata et al., 2020; Poiroux et al., 2015)<sup>31</sup>. Heremans et son équipe (2008) ont ainsi montré que les mouvements oculaires réalisés pendant la pratique physique étaient congruents avec ceux de la pratique mentale (Fig. 28, partie B). Déterminer les patterns d'exploration visuelle durant l'imagerie et les comparer avec ceux réalisés pendant la pratique physique permettrait donc d'estimer une congruence oculo-motrice.

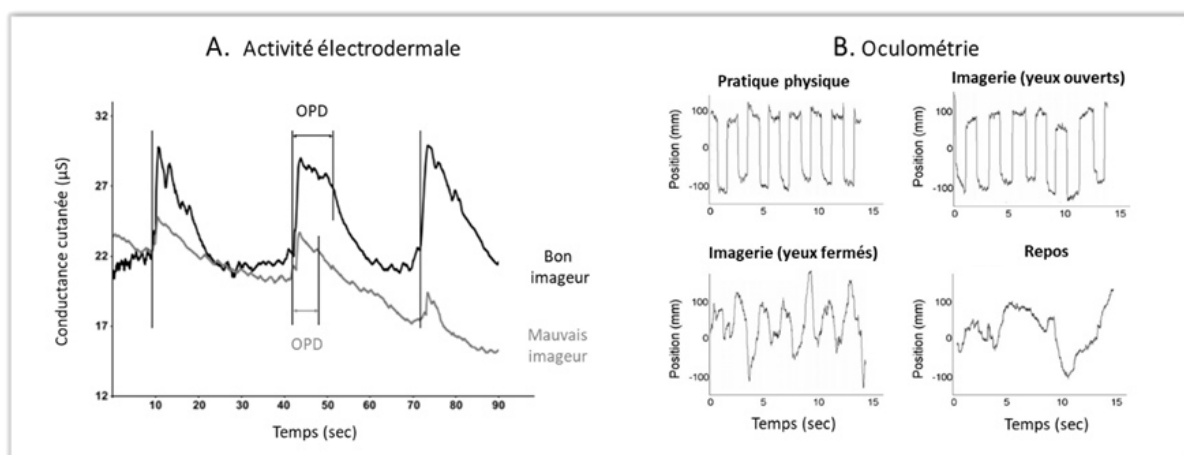


Figure 28. Données issues d'outils objectifs d'évaluation de l'imagerie motrice. (A) Réponse de la conductance cutanée pendant l'imagerie motrice. Chaque barre verticale représente le début de l'imagerie et de la réponse électrodermale associée. La durée de la perturbation ohmique (OPD) est un marqueur de performance, plus la durée est longue plus l'image est de bonne qualité. La tendance générale de la courbe (noire = maintien, grise = diminution) reflète le niveau d'activation pendant la session d'imagerie. Figure traduite et extraite de "Measuring Motor Imagery Using Psychometric, Behavioral, and Psychophysiological Tools", Collet et al. (2011). (B) Mouvements des yeux sur un axe vertical. On remarque que les mouvements des yeux lors de l'imagerie motrice sont quasiment superposables à ceux de la pratique physique. Le pattern observé avec les yeux fermés est proche de celui de la pratique physique, ce qui signifie que des mouvements oculaires congruents à la pratique physique sont présents même avec les yeux fermés. Figure traduite et extraite de "The eyes as a mirror of our thoughts: Quantification of motor imagery of goal-directed movements through eye movement registration", Heremans et al. (2008).

<sup>31</sup> Pour plus de détails sur l'oculométrie, voir chapitre : les marqueurs et outils de mesures du stress aigu physiologique.

Les recherches actuelles sur l'imagerie motrice ne cherchent plus à prouver son efficacité, mais plutôt à déterminer les conditions optimales de pratique. Récemment, ces études s'intéressent aux impacts de l'âge, des modalités d'exécutions (visuelle, kinesthésique), des modes de pratique (statique, dynamique<sup>32</sup>), du point de vue (interne, externe)<sup>33</sup>, de la fatigue, ou encore du cycle circadien sur la qualité de l'imagerie motrice (Debarnot et al., 2012; Demougeot et Papaxanthis, 2011; Di Rienzo et al., 2012; Ferreira Dias Kanthack et al., 2016; Gueugneau et al., 2009). Etant donné qu'il est attendu que les capacités d'imagerie aient des répercussions sur les performances physiques, déterminer l'impact de différentes conditions psychophysiologiques, comme la fatigue ou le stress, reste nécessaire afin de mettre en place des interventions d'imagerie les plus efficaces possibles. Alors que la fatigue a fait l'objet de nombreuses études récentes (Di Rienzo et al., 2012; Ferreira Dias Kanthack et al., 2016), il est étonnant de constater qu'aucune étude précédente n'a cherché à caractériser l'impact du stress sur les capacités d'imagerie motrice.

---

<sup>32</sup> L'imagerie dynamique est très utilisée lors de compétitions sportives nécessitant la résolution de problèmes. Par exemple, avant de se lancer dans une voie d'escalade, les compétiteurs ont l'habitude d'anticiper les mouvements qu'ils devront ensuite réaliser. Pour cela, le grimpeur peut visualiser mentalement un mouvement complexe et réaliser une partie du mouvement anticipé en faisant correspondre la position de ses mains avec la position imaginée. Voir à 3:48:43 secondes : <https://www.france.tv/sport/les-jeux-olympiques/2603521-escalade-finales-f-direct-du-06-08.html>

<sup>33</sup> Le point de vue interne consiste à se visualiser comme si on se filmait avec nos propres yeux. Le point de vue externe consiste plutôt à se visualiser comme si une caméra extérieure nous filmait.

## 2.1.2. Etude 1 : Impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie motrice explicite et implicite

### 2.1.2.1. Introduction

L'imagerie motrice est largement utilisée dans le milieu sportif et médical. Ces milieux peuvent être associés à du stress et de l'anxiété. Dans un contexte sportif, les compétitions sont génératrices d'un stress important qui est principalement ressenti en amont et pendant les compétitions. Ce stress est notamment engendré par les pressions de performances et par une évaluation sociale (James et Collins, 1997). Dans un contexte médical, certains programmes de rééducation sont associés à un stress et une anxiété importante pour le patient. Les sources de stress sont variées et nombreuses. Les patients peuvent ressentir la pression du personnel soignant, ou encore avoir des craintes sur le degré de récupération des fonctions motrices et l'implication que cela engendrerait dans leur vie personnelle et professionnelle (Jones et al., 2000). Il est étonnant de constater que malgré l'occurrence de situations stressantes dans ces milieux, l'impact du stress sur les capacités d'imagerie motrice reste à ce jour inexploré.

Notre étude vise à caractériser l'impact du stress aigu sur les capacités d'imagerie explicite (tâche de pointage manuelle) et implicite (jugement de latéralité). Les capacités d'imagerie seront évaluées après un stressor psychophysique (*SECPT*)<sup>34</sup> ou une condition contrôle. Les capacités d'imagerie motrice seront évaluées de manière objective et semi objective (nombre d'erreurs, temps de réaction, isochronie temporelle) et subjective (EVA vivacité).

- ❖ L'imagerie motrice est la capacité naturelle humaine de simuler un mouvement mentalement
- ❖ Les entraînements par imagerie motrice permettent l'amélioration de l'apprentissage moteur et le perfectionnement d'un mouvement
- ❖ L'imagerie motrice est particulièrement utilisée dans les domaines sportif et médical, qui peuvent être générateurs d'un stress important
- ❖ L'impact du stress sur les capacités d'imagerie motrice implicite et explicite reste à ce jour inexploré

---

<sup>34</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : induction du stress.

## 2.1.2.2. Manuscript 1: Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study

International Journal of Psychophysiology 152 (2020) 62–71



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Psychophysiology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijpsycho](http://www.elsevier.com/locate/ijpsycho)



### Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study

Sophie Schlatter<sup>a,\*</sup>, Aymeric Guillot<sup>a</sup>, Camille Faes<sup>a</sup>, Elodie Saruco<sup>b</sup>, Christian Collet<sup>a</sup>, Franck Di Rienzo<sup>b</sup>, Ursula Debarnot<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France  
<sup>b</sup> Neurologische Universitätsklinik, Bergmannsheil gGmbH, Forschungsgruppe Plastizität, Bürkle-de-la-Camp-Platz 1, 44789 Bochum, Germany



#### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Cognitive ability  
Motor performance  
Acute stress  
Social Cold Pressor Test  
Mental practice

#### ABSTRACT

Motor imagery (MI) is the capacity to mentally perform one or a set of movements without concomitant overt action. MI training has been shown to enhance the subsequent motor performance. While the benefits of MI to manage stress have been extensively documented, the reverse impact of stress on MI received far less attention. The present study thus aimed to evaluate whether acute stress might influence MI abilities. Thirty participants were assigned either to a stress or a control group. The Socially Evaluated Cold Pressor Test (SECPPT) was used to induce stress, with heart rate, electrodermal activity, salivary cortisol, and self-report perceived levels of stress being monitored during the experiment. Stress induction was followed by both implicit (laterality judgment) and explicit (sequential pointing) MI tasks. Main results showed a deleterious impact of stress on implicit MI, while explicit MI was not altered. These exploratory findings provide a deeper understanding of stress effects on cognition, and practically support that under stressful conditions, as during a sport competition or rehabilitation contexts, explicit MI should be prioritized.

#### 1. Introduction

Everyone has already experienced a stress reaction that generally occurs in situations such as talking in front of an audience, having an exam at the hospital or competing in sport events. Stress arises when the environmental demands exceed the adaptive capacity of the organism, which results in biological and psychological changes (Cohen et al., 1997). Such latter are modulated through the rapid stimulation of the sympathetic nervous system as well as the long lasting activation of the hypothalamus-pituitary adrenal axis, which cause the secretion of stress hormones (Dallman and Hellhammer, 2010). Notably, the catecholamines and glucocorticoids facilitate a fight-or-flight response by increasing heart rate, lung actions and blood flow toward muscles and brain (Cannon, 1935). Stress also influences numerous neural pathways and brain systems, even though deep examination on the effects of stress on cognition processes revealed mixed results (Shields et al., 2016, 2017; Smeets et al., 2008). It has been argued that dissimilar stress-effects on cognition might depend on the amount, localisation and type of corticosteroid brain receptors (Harris et al., 2013; Vogel et al., 2016). Such latter are not ubiquitously distributed and both hippocampus and prefrontal cortex preponderantly interact with stress

hormones (Butts et al., 2011; Kim and Diamond, 2002). The hippocampus is particularly sensible, and both structural and functional modifications of this region were observed in several psychological diseases (depression, post-traumatic stress syndrome, chronic stress), underlining its crucial role in emotional processing (Dedovic et al., 2009a; McEwen, 2000). Hippocampus is also involved in spatial abilities and declarative memory, while prefrontal cortex is known to regulate executive functions such as working memory, reasoning and decision-making (Burgess et al., 2002; Miller and Cohen, 2001). Yet, most of the deleterious effects of stress on cognition have been linked to hippocampus and prefrontal cortex activities (Arnsten, 2009; Qin et al., 2009; Wingenfeld and Wolf, 2014; Woodcock et al., 2019). Although many studies revealed a detrimental impact of acute stress on working memory (see Shields et al., 2016, 2017 for meta-analyses), there is surprisingly less literature on its potential effects on spatial abilities (Richardson and VanderKaay Tomasulo, 2011; Schwabe et al., 2007; Taverniers et al., 2011).

Motor imagery (MI), defined as the mental simulation of movements without concomitant motor execution, is a remarkable cognitive function engaging both working memory and spatial processes (Guillot and Collet, 2010; Holmes and Calmels, 2008). Practically, MI can be

\* Corresponding author at: Inter-University Laboratory of Human Movement Biology -EA 7424, University Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France.  
E-mail addresses: [sophie.schlatter@univ-lyon1.fr](mailto:sophie.schlatter@univ-lyon1.fr) (S. Schlatter), [aymeric.guillot@univ-lyon1.fr](mailto:aymeric.guillot@univ-lyon1.fr) (A. Guillot), [camille.faes@univ-lyon1.fr](mailto:camille.faes@univ-lyon1.fr) (C. Faes), [elodie.saruco@ruhr-uni-bochum.de](mailto:elodie.saruco@ruhr-uni-bochum.de) (E. Saruco), [christian.collet@univ-lyon1.fr](mailto:christian.collet@univ-lyon1.fr) (C. Collet), [franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr](mailto:franck.di-rienzo@univ-lyon1.fr) (F. Di Rienzo), [ursula.debarnot@univ-lyon1.fr](mailto:ursula.debarnot@univ-lyon1.fr) (U. Debarnot).

<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011>

Received 27 July 2019; Received in revised form 9 April 2020; Accepted 10 April 2020

Available online 14 April 2020

0167-8760/ © 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 2.1.1.2.3.

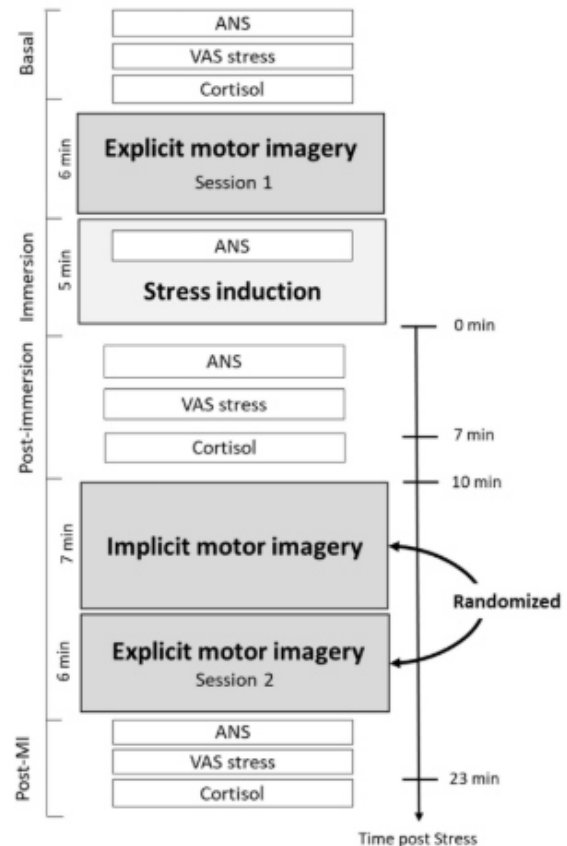
performed either explicitly or implicitly. During explicit MI, individuals consciously imagine goal-directed movements, and usually receive explicit instructions to preserve the spatiotemporal aspects of the corresponding overt actions. Besides the vividness of the mental image, previous research provided strong evidence of the temporal equivalence between MI and actual practice execution as a marker of imagery accuracy (Guillot et al., 2012). In implicit MI paradigms, individuals do not receive specific instruction about MI practice, while they may spontaneously engage unconscious mental actions, e.g. mental rotation of hands (Boonstra et al., 2012; Conson et al., 2011; Meugnot and Toussaint, 2015; Sirigu and Duhamel, 1996). Interestingly, actual practice and MI of the same movement activate overlapping neural networks (Héту et al., 2013), hence demonstrating a neurofunctional equivalence between these two types of practice. Several studies further demonstrated that explicit MI substantially contributes to improve motor performance and promote motor recovery, for instance by improving speed and accuracy of movements (Driskell et al., 1994; Ferreira Dias Kanthack et al., 2016; Malouin et al., 2013). Although MI is increasingly used in sport competitions and clinical settings following injuries (Evans et al., 2006; Grangeon et al., 2012; Mateo et al., 2018), the effects of the stress generated in those environments have not been considered so far (James and Collins, 1997; Jones et al., 2000). Determining whether MI ability is maintained or altered under stress has therefore important conceptual and practical implications in order to design successful imagery interventions.

The aim of the present study was to explore the effects of acute stress on both implicit and explicit MI. Implicit MI predominantly requires visuospatial abilities and spatial working memory processes which should be impaired under stressful conditions (Shackman et al., 2006). Explicit MI rather requires memory retrieval processes of movements from long-term memory (Holmes and Calmels, 2008). Despite inconsistent stress-related effects on procedural memory (Dolfen et al., 2019; Schwabe et al., 2009), stress has been extensively shown to impair long term memory (Wolf, 2017; Hidalgo et al., 2019). Based on these findings, we expected that acute stress might also be harmful to explicit MI.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Participants

Thirty healthy participants aged between 18 and 27 years (15 men,  $22.60 \pm 2.44$  years and 15 women,  $21.13 \pm 2.50$  years) voluntarily took part in the experiment. Participants were recruited from public announcement at the Sport and Science department (University Claude Bernard Lyon 1), and were pseudo-randomly assigned in a stress ( $n = 15$ ) or control group ( $n = 15$ ). Right-hand dominance and lack of depressive state (Beck's score  $\leq 4$ , Beck and Beamsderfer, 1974) were the main criteria for inclusion. Participants were good sleepers (Pittsburgh Sleep Quality Index  $< 7$ , Buysse et al., 1989), and had an intermediate chronotype score ranging from 36 to 61 at the morningness-eveningness questionnaire (Horne and Östberg, 1977). They were no smokers, without any history of chronic disease, and were asked to have moderate physical activity with no alcohol consumption the day before the experiment. They were finally requested to avoid food and caffeine beverages 2 h before the experiment. All testing sessions were scheduled in the afternoon between 2 and 5 p.m. Three data about phase of menstrual cycles were missing in the control group: two women were not able to report the days of their last menses and one declared no menses for months. Participants received a detailed informative note and provided a written consent form in agreement with the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2003). They further received a 20 € gift card for their participation.



**Fig. 1.** Timeline of the experimental design. The ANS (Autonomous Nervous System) corresponds to the recording of the heart rate and electrodermal activity. The VAS (Visual Analogous Scale) corresponds to the subjective stress assessment. The stress induction consists to the 'cold immersion' of feet for the stress group or the 'warm immersion' for the control group. The explicit MI task was performed before (Session 1) and after (Session 2) the immersion. The implicit MI task was randomly performed before or after the second session of explicit MI.

### 2.2. Experimental design

Preliminary assessments were performed a week before the experiment and both visits occurred in the same quiet room (temperature  $21.50 \pm 3$  °C), without any distracting stimuli. The experiment was divided in 4 main steps: (i) explicit MI, (ii) stress induction period (or control), (iii) implicit MI, and (iv) explicit MI retest (Fig. 1). Subjects performed two classical MI paradigms, namely the implicit laterality judgment task (Boonstra et al., 2012; Conson et al., 2011; Sirigu et al., 1996) and the explicit finger pointing task (Grangeon et al., 2012; Marstaller et al., 2013; Mateo et al., 2018). Importantly, after the stress induction period, the order of the MI tasks was pseudo-randomised among participants to avoid any order effect. Noteworthy, two experimenters were involved in this study. The main experimenter (SS) adopted a neutral behavior with all participants, and conducted the preliminary assessments and the major part of the experiment. The second experimenter (ES) only interacted with participants of the stress group during the stress induction phase, by adopting a predetermined "cold" and distant behavior. Such authoritative behaviour was important to reinforce the social stress aspect of the stress induction.

### 2.2.1. Preliminary assessments

During the 1st visit at the laboratory, all participants underwent preliminary assessments that included general level of stress, stress management and individual MI abilities. The general level of stress was assessed with the state anxiety questionnaire STAI-Y-B (Spielberger et al., 1983). MI ability was measured using the Revised Movement Imagery Questionnaire MIQ-R (Hall and Martin, 1997), where participants performed whole body movements both physically and mentally. MI was either visual (i.e., visualizing the movement through their own eyes) or kinesthetic (i.e., perceiving the body sensations usually associated with the actual execution of the action, including muscle force and stretching, pressure on joints, perceived effort and balance). After each MI trial, participants rated the quality of their mental representation on a scale ranging from 1 (not clear at all) to 7 (very clear).

### 2.2.2. Experimental session

At the beginning of the experiment, two electromyographic electrodes were placed on the right and left brachio radialis muscles to check the absence of muscular activity during MI (ADInstruments® and Delsys system®). Then, participants completed a demographic questionnaire including the following information: size, weight, level of education, contraception, menstrual cycle.

**2.2.2.1. Explicit MI task.** The explicit MI paradigm consisted in a sequential pointing task adapted from Mateo et al. (2018). Participants stood up in front of a rigid support (size A3) covered with 11 circular targets (8 mm diameter) (Fig. 2a). A red spot placed in the centre of the support indicated where to start-and-stop the pointing movement. Ten blue spots, identified with letters in the centre, were placed around the red spot at a varied distance from 8 to 20 cm. Participants were requested to place their right index over the red start spot, and then to perform a sliding out-and-back movement toward the peripheral blue spots, following the alphabetic order, at a self-pace and comfortable speed. After physical practice, they were requested to perform MI of the same sequential pointing movements. SS briefly reminded the modalities and instructions of explicit MI practice, and asked participants to mentally rehearse the motor sequence in combining visual and kinesthetic modalities. After these two familiarization trials (1 physical and 1 MI), all participants performed five sets of 1 physical trial followed by 1 MI trial (i.e., a total of 6 physical and 6 MI trials). During both type of practices, participants were requested to say 'Go' when they started the first move, and 'Stop' when they finished the whole sequence of movements. The

experimenter recorded sequence durations from the "Go" to the "Stop" signals using a digital timer (1/100 s, XL-013 anytime ®). As during physical practice, participants kept their eyes open during MI, hence providing congruent visual information across experimental conditions and allowing visual tracking. They were asked to open their eyes during explicit imagery to replicate the same conditions as during the lateral judgment task (implicit MI task). Although some researchers recommended to perform MI with closed eyes (Schuster et al., 2011), a large body of experimental studies provided evidence that there was no direct influence on the subsequent motor performance relative to the open eyes condition. To note, closing eyes during the imagery task does not prevent from visual tracking, and abilities to perform efficient MI are not dependent of eyes movements (Debarnot et al., 2011; Heremans et al., 2008).

The explicit MI task was performed both before (Session 1) and after (Session 2) the stress induction period (Fig. 1). Means of physical and MI durations were calculated and computed into a ratio for each session  $((\text{mean}_{\text{physical}} - \text{mean}_{\text{imagery}}) / \text{mean}_{\text{physical}})$ . This ratio was dedicated to estimate the temporal equivalence between physical and imagined movements. A ratio close to zero meant no difference between MI and actual execution times, thus reflecting the respect of the temporal features of MI. Right after each session, subjective accuracy was evaluated using a Visual Analogue Scale for vividness of the motor images (VAS-vividness), and ease of the explicit MI task (VAS-ease).

**2.2.2.2. Implicit MI task.** The implicit MI task consisted in a laterality hand/foot judgment task. Participants seated on a chair about 50 cm from a 17-inch computer screen. Their hands were lying on their knees, and the desk avoided visual feedback from hands and feet. The stimuli were either hands or feet pictures (13 cm height, 7 cm width, Fig. 2b) and were displayed in one of the four orientations (0°, 90°, 180° or 270°), from a dorsal or palmar view. At the beginning of each trial, a fixation cross was displayed during 0.5 s in the centre of the screen. Each stimulus was then presented and remained visible during 3 s. Participants were instructed to identify the laterality of each stimulus displayed on the computer screen as accurately and quickly as possible, by answering verbally 'left' or 'right'. Response time (RTs) was the time duration from stimulus onset to the beginning of the participant's response. For each trial, SS manually collected response accuracy. A MATLAB® script controlled stimulus presentation and recorded answers using a microphone connected to the computer, allowing one to collect RTs, and check for response accuracy. All participants were first familiarized with the task using 6 trials of hands and feet stimuli.

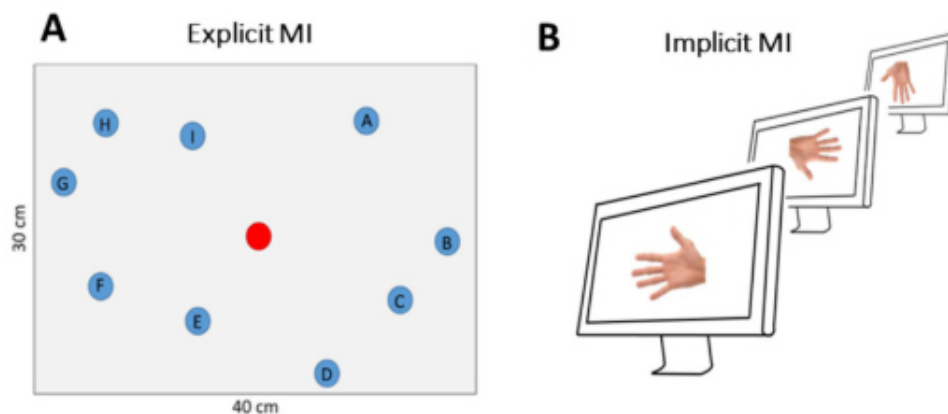


Fig. 2. A: Schema of the rigid support used during the sequential pointing task. Spots represent the stickers (real size; 8 mm). The central red spot represents the start-and-stop point. B: Laterality judgment task. Stimuli displayed on the screen during 3 s were 13 cm height and 7 cm width pictures of HANDS and FEET, displayed in four orientations (0°, 90°, 180°, 270°) and two views (DORSAL or PALM).

Then, they performed 4 randomized blocks (2 blocks with hand pictures and 2 blocks with feet pictures). Each block contained 16 trials, with half of left and right images randomly displayed. Finally, participants were asked to rate the perceived difficulty to perform the task using Likert scales ranging from 0 (not difficult at all) to 7 (very difficult). The implicit task was performed only once, to avoid any learning effect between practice sessions (Boonstra et al., 2012).

**2.2.2.3. Stress induction.** Stress was induced by the Socially Evaluated Cold-Pressor Test (SECPT; Schwabe et al., 2008). Participants of the stress group were requested to fully immerse their feet/ankles during 180 s (or until they could no longer tolerate it) into a container filled with ice water (always  $< 2^{\circ}\text{C}$ ). The social interaction during the cold immersion sequence was carried by ES who wore a lab coat along with a “strict-evaluating” behavior, while SS left the experimental room. Additionally, participants had to remain silent, and were videotaped during the immersion. By contrast, participants of the control group were asked to immerse their feet/ankles into warm water (35–37  $^{\circ}\text{C}$ ) during 180 s, and were not videotaped. SS remained with the participants of the control group in keeping a neutral behaviour throughout the experiment.

#### 2.2.3. Dependent variables controlling stress induction

**2.2.3.1. Autonomic nervous system measures.** We recorded the autonomic nervous system activity throughout the experimental session, by monitoring cardiac and electrodermal activity (Labchart<sup>®</sup> software, ADInstruments<sup>®</sup>). Cardiac activity was indexed from the heart rate (bpm) using 3 cardiac electrodes (ADInstruments<sup>®</sup>, Delsys system<sup>®</sup> wireless transmission), while electrodermal activity was collected from tonic measures of the skin conductance ( $\mu\text{S}$ ), using 2 unpolarized electrodes (MLT116f GSR Finger Electrodes, ADInstruments, Dunedin, New Zealand) attached to the 2nd and 3rd digits of the non-dominant hand. The acquisition device involved opening the galvanic skin resistance circuit (set up of the ground-zero) and then established the individual baseline level for each subject, i.e., corresponding to the initial skin conductance resting plateau over 30 s ( $23.92 \mu\text{S} \pm 9.56$ ). We calculated the average heart rate and skin conductance value over 3 min, at 4 time points, i.e., basal level, during immersion, after immersion, and right after MI tasks (Fig. 1).

**2.2.3.2. Cortisol measures.** The diurnal rhythm of cortisol secretion was controlled by scheduling all experimental sessions between 2 and 5 pm. Saliva samples were collected using Salivette collection devices (Sarstedt<sup>®</sup>) at 3 different time-points: before immersion (basal level), after the immersion (post-immersion; 7 min  $\pm$  35 s), and right after the experimental tasks (post-MI; 23 min post-immersion  $\pm$  5 min) (Fig. 1). The time elapsed from the onset of immersion and collection of the different saliva samples was similar in both group. Salivettes were conserved in ice before centrifugation (5 min at 5,000 rpm), and stored at  $-20^{\circ}\text{C}$  before analysis (Kudielka et al., 2004). Salivary cortisol concentrations were assayed using a commercially available competitive enzyme-linked immunosorbent kit (Cortisol ELISA KIT, abcam<sup>®</sup>) according to manufacturer's instructions.

**2.2.3.3. Psychometric measures.** Before, immediately after the immersion, and after the MI tasks, all participants rated on a VAS how stressful they experienced the situation (from 0 “absolutely not stressed” to 100 mm “extremely stressed”).

### 2.3. Statistical analysis

#### 2.3.1. Linear mixed effects analyses

Statistics were performed using the R freeware (3.6.1). Means groups of demographic parameters were compared with Student's *t*-tests. We used linear mixed effects models, i.e. *lme* function from the *nlme* R package (Pinheiro et al., 2011), with a by-subject random

intercept to evaluate the effect of the experimental session on the dependent variables quantifying stress (heart rate, skin conductance, salivary cortisol, VAS-stress). For heart rate and skin conductance, we entered TEST (BASELINE, IMMERSION, POST-IMMERSION, POST-MI) and GROUP (CONTROL, STRESS) with interaction term as the fixed effects. For salivary cortisol and VAS-stress scores, we entered TEST (BASELINE, POST-IMMERSION, POST-MI) and GROUP (CONTROL, STRESS) with interaction term. For the implicit MI analysis, we ran an outlier detection on overall RT data (1.5 inter-quartile range rejection threshold, leading to the exclusion of 70 trials out of 1784 (3.92% rejection rate). This procedure contributed to avoid excluding any participant from the analysis. Then, we entered as fixed effect the interaction between GROUP (CONTROL, STRESS) and STIMULUS ORIENTATION (0°, 90°, 180°, 270°), VIEW (DORSAL, PALM) and TYPE (HAND, FOOT). To analyse answers accuracy, we implemented the same random-coefficient regression model, yet accounting for binomial error distribution (*glmer*, *lme4* and *data.table*, Bates et al., 2019; Dowle et al., 2019). For difficulty scores, the linear model accounted for the fixed effect of GROUP (CONTROL, STRESS). Finally, for the explicit MI task, we performed linear mixed effects models on the temporal equivalence ratio, VAS- vividness scores, and VAS-ease scores, using TEST (SESSION 1, SESSION 2) and GROUP (CONTROL, STRESS) as fixed effects, with interaction term.

Visual inspection of the residual plots did not reveal any obvious deviation from homoscedasticity or normality. The statistical significance threshold was set up for a type 1 error rate of  $\alpha = 5\%$ . As effect sizes, we reported partial coefficients of determination ( $R_p^2$ ) which represent the percentage of explained variation of the predicted variable for each main and interaction effect. We used an ad hoc procedure for linear mixed effects models implemented in the *r2glmm* package (Jaeger et al., 2016). As post-hoc investigations, we used general linear hypotheses testing of planned contrasts from the mult-comp package for post hoc investigations (Horthorn et al., 2020). We applied Shaffer's corrections for multiple comparisons to control the false discovery rate (Shaffer, 1986; Westfall, 1997). Power calculations were carried on using the *pwr.f2.test* and the *pwr.chisq.test* functions of the *pwr* package R (Champely et al., 2018).

#### 2.3.2. Power and sample size

Based on the gap in the literature looking at the effects of stress on MI, we did not run an a priori power analysis to determine the sample size required to achieve reliable statistical power. Adequate sample size was inferred from past experiments involving comparable designs. Basically, studies investigating the effects of acute stress on spatial and memory abilities used stress protocol induction and analysed cognitive performances through between-groups designs (stress versus control). Previous investigations recruited on average 15 healthy participants per group. They tested specifically mental rotation (10 vs 10, Bell, 2015), spatial navigation (14 vs 15, Thomas et al., 2010), spatial task (21 vs 26, Richardson and VanderKaay Tomasulo, 2011), and visuo-spatial memory abilities (12 vs 12, Taverniers et al., 2013) (13 vs 14, Taverniers et al., 2010).

To overcome limitations associated with the absence of an a priori power analysis, we addressed the issue of reproducibility by running a posteriori power analyses. We used the *pwr* package implemented in R (Champely et al., 2018). We calculated the statistical power for interaction effects involving the fixed effect of GROUP in the linear mixed analysis carried on MI performance variables (i.e. [response time]). Based on the degrees of freedom of the type-2 ANOVA calculated from the random-coefficient regression model, and considering a type 1 error rate of 5% as statistical significance threshold, the *pwr.f2.test* revealed that a sample size of  $n = 15$  per group would yield a statistical power of  $p_{(1-\beta)} = 0.80$  for small effect sizes, i.e. corresponding to 1–5% of explained variation ( $R_p^2$ ). The statistical power was superior to 0.80 for medium and large effect sizes, i.e. corresponding to 20% of explained variation and higher.

**Table 1**

Values expressed are means  $\pm$  SD for both groups (CONTROL vs STRESS), Cohen's d with CI 95% were provided.

	Control (n = 15)	Stress (n = 15)	p value	Effect size [95% CI]
<b>Demographic parameters</b>				
All participants				
Age (years old)	22.13 $\pm$ 2.36	21.60 $\pm$ 2.77	0.58	0.21 [-0.48; 1.17]
Body mass index (kg.m <sup>-2</sup> )	23.89 $\pm$ 5.27	21.82 $\pm$ 3.00	0.20	0.50 [-0.22; 1.14]
Education (years post bachelor)	2.80 $\pm$ 1.37	2.47 $\pm$ 1.36	0.51	0.25 [-0.50; 0.99]
Women				
Hormonal contraception	4/7	6/8		
Phase of menstrual cycle	3 follicular (5 luteal)	2 follicular (2 luteal)		
<b>Anxiety</b>				
STAI-Y-B	30.00 $\pm$ 6.08	26.60 $\pm$ 6.16	0.14	0.58 [-0.23;1.61]
<b>General MI ability</b>				
MIQ-R kinesthetic	21.20 $\pm$ 4.46	19.67 $\pm$ 4.98	0.38	0.34 [-0.38;1.14]
MIQ-R visual	24.67 $\pm$ 2.19	22.80 $\pm$ 3.26	0.08	0.70 [-0.03;1.40]

### 3. Results

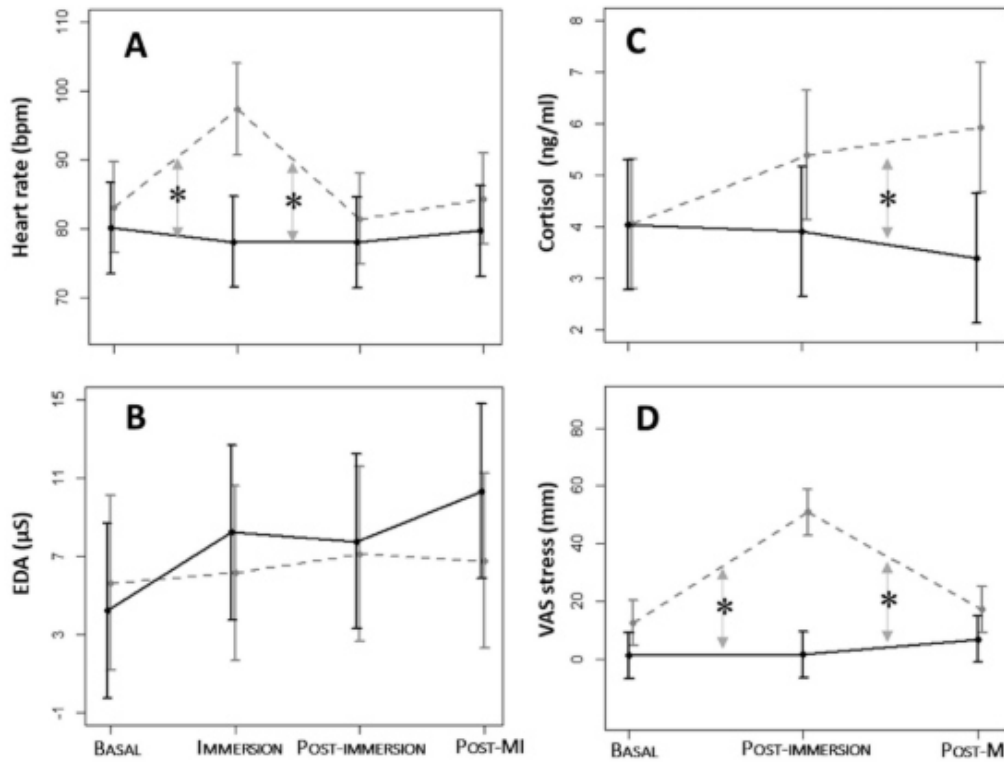
#### 3.1. Group homogeneity

Both groups were equivalent in terms of demographic characteristics, anxiety traits and MI ability (Table 1).

#### 3.2. Analysis of stress induction

Participants of the stress group maintained the immersion during 159 s  $\pm$  50 (M  $\pm$  SD), while all participants of the control group completed the requested 180 s of immersion. There was a GROUP by

TIME interaction for heart rate ( $\chi^2(3) = 49.40$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.36$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.99$ , Fig. 3A), salivary cortisol ( $\chi^2(2) = 12.00$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.07$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.41$ , Fig. 3C), and VAS-stress ( $\chi^2(2) = 41.54$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.16$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.80$ , Fig. 3D), whereas no interaction was found for skin conductance ( $\chi^2(3) = 2.54$ ,  $p = 0.46$ , Fig. 3B). No main GROUP effect was detected for heart rate ( $\chi^2(1) = 2.95$ ,  $p = 0.09$ ), salivary cortisol ( $\chi^2(1) = 2.91$ ,  $p = 0.09$ ), and skin conductance ( $\chi^2(1) = 0.24$ ,  $p = 0.62$ ). A GROUP effect was detected for VAS of stress ( $\chi^2(1) = 34.70$ ,  $p > 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.43$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.93$ ). Main TIME effects were detected for heart rate ( $\chi^2(1) = 38.59$ ,  $p > 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.25$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.93$ ), cortisol ( $\chi^2(1) = 2.91$ ,  $p = 0.09$ ,  $R_p^2 = 0.08$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.46$ ) and VAS of stress



**Fig. 3.** Plot of the GROUP by TEST interaction with 95% confidence intervals for stress marker. A: Cardiac rhythm. B: Electrodermal Activity (EDA). C: Salivary cortisol level. D: Psychological stress indexed from stress Visual Analogous Scales scores. Black lines correspond to the Control group. Grey dashed lines correspond to the Stress group. Asterisks correspond to significant post hoc analyses results, precisely when the slopes between two TIME points are different between the GROUPS.



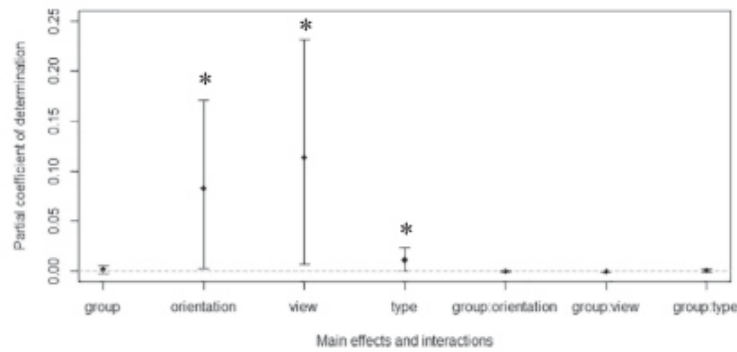


Fig. 4. Partial coefficient of determination ( $R_p^2$ ) and 95% confidence interval calculated from the linear mixed effect on response times. The dashed line represents a null effect size and stars correspond to a significant result.

( $\chi^2(1) = 33.86$ ,  $p > 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.30$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.96$ ), but not for skin conductance ( $\chi^2(1) = 5.19$ ,  $p = 0.16$ ).

Post-hoc analyses revealed that compared to the CONTROL group (78.06 bpm  $\pm$  12.81), the STRESS group had an elevated heart rate (97.35 bpm  $\pm$  19.16) during IMMERSION (fitted estimate:  $-16.27 \pm 2.72$ ,  $p < 0.001$ ). Also, compared to the CONTROL group (1.55 mm  $\pm$  4.64), the STRESS group (49.64 mm  $\pm$  25.73) exhibited a significant increase in VAS-stress during POST-IMMERSION (fitted estimate:  $-86.47 \pm 15.67$ ,  $p < 0.001$ ). Compared to the CONTROL group (3.38 ng/ml  $\pm$  2.38) the STRESS group (5.93 ng/ml  $\pm$  3.53) had higher salivary cortisol during Post-MI (fitted estimate:  $-2.54 \pm 0.74$ ,  $p < 0.01$ ). Overall, psychological and physiological measures therefore strongly attested the reliability of stress induction.

### 3.3. Analysis of MI performance

#### 3.3.1. Implicit MI

3.3.1.1. Response times. RTs data revealed no significant GROUP by ORIENTATION ( $\chi^2(3) = 1.28$ ,  $p = 0.74$ ), GROUP by VIEW ( $\chi^2(1) = 0.23$ ,  $p = 0.64$ ) or GROUP by TYPE of image ( $\chi^2(1) = 2.49$ ,  $p = 0.11$ ) interactions (Fig. 4). No main GROUP effect was detected (CONTROL:  $1.49 \pm 0.49$ ; STRESS:  $1.46 \pm 0.47$ ;  $\chi^2(1) = 0.30$ ,  $p = 0.58$ ). Data revealed a significant effect of stimulus ORIENTATION ( $\chi^2(3) = 169.05$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.08$ ,  $p_{(1-\beta)} = 1$ ), VIEW ( $\chi^2(1) = 220.23$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.10$ ,  $p_{(1-\beta)} = 1$ ) and TYPE of image ( $\chi^2(1) = 45.32$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.02$ ,  $p_{(1-\beta)} = 1$ ). Post-hoc analysis revealed that FOOT ( $1.54 \pm 0.52$ ) were harder than HANDS ( $1.40 \pm 0.42$ ) (fitted estimate:  $-0.13 \pm 0.01$ ,  $p < 0.001$ ), items displayed in PALM VIEW ( $1.62 \pm 0.49$ ) were more difficult than in DORSAL view ( $1.34 \pm 0.42$ ) (fitted estimate:  $-0.28 \pm 0.02$ ,  $p < 0.001$ ). Compared to  $0^\circ$  ( $1.39 \pm 0.46$ ) items displayed at  $90^\circ$  ( $1.44 \pm 0.45$ ) (fitted estimate:  $-0.28 \pm 0.02$ ,  $p < 0.001$ ) and  $180^\circ$  ( $1.69 \pm 0.49$ ) (fitted estimate:  $-0.31 \pm 0.03$ ,  $p < 0.001$ ) were also more difficult.

3.3.1.2. Accuracy. Accuracy data revealed no significant GROUP by ORIENTATION ( $\chi^2(3) = 0.08$ ,  $p = 0.99$ ) or GROUP by VIEW ( $\chi^2(1) = 2.39$ ,  $p = 0.12$ ) interaction. We however found a GROUP by TYPE of image interaction ( $\chi^2(1) = 7.66$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.16$ ,  $p_{(1-\beta)} = 1$ ). The STRESS group made significantly more errors in the judgment of HANDS ( $0.14 \pm 0.34$ ) than the CONTROL group ( $0.12 \pm 0.33$ ) (fitted estimate:  $-0.94 \pm 0.34$ ,  $p < 0.01$ , Fig. 5). No main GROUP effect was detected (CONTROL:  $0.11 \pm 0.31$ ; STRESS:  $0.13 \pm 0.34$ ;  $\chi^2(1) = 0.30$ ,  $p = 0.58$ ). Data revealed a significant effect of stimulus ORIENTATION ( $\chi^2(3) = 27.04$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.08$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.85$ ), VIEW ( $\chi^2(1) = 44.93$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.06$ ,  $p_{(1-\beta)} = 0.75$ ) and TYPE of image ( $\chi^2(1) = 18.24$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.14$ ,  $p_{(1-\beta)} = 1$ ). Post-hoc analysis revealed that

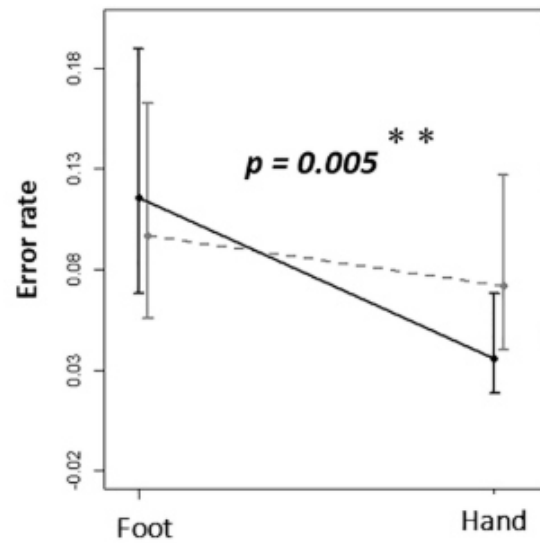


Fig. 5. Plot of the GROUP by TYPE of image interaction with 95% confidence intervals for accuracy in explicit MI ability. Black lines correspond to the Control group. Grey dashed lines correspond to the Stress group.

FOOT items ( $0.15 \pm 0.36$ ) were harder than HANDS ones ( $0.09 \pm 0.28$ ) (fitted estimate:  $-0.80 \pm 0.17$ ,  $p < 0.001$ ), and that items displayed in PALM view ( $0.18 \pm 0.38$ ) were more difficult than in DORSAL view ( $0.07 \pm 0.26$ ) (fitted estimate:  $-1.11 \pm 0.16$ ,  $p < 0.001$ ). Compared to  $0^\circ$  ( $0.08 \pm 0.28$ ) items displayed at  $90^\circ$  ( $0.13 \pm 0.34$ ) (fitted estimate:  $-0.63 \pm 0.23$ ,  $p = 0.02$ ) and  $180^\circ$  ( $0.18 \pm 0.38$ ) were more difficult (fitted estimate:  $-1.03 \pm 0.23$ ,  $p < 0.001$ ).

There was no main effect of GROUP in subjective ratings of implicit difficulty task (CONTROL:  $4.23 \pm 1.46$ , STRESS:  $4.43 \pm 1.89$ ;  $\chi^2(1) = 0.11$ ,  $p = 0.75$ ).

#### 3.3.2. Explicit MI

There was no significant GROUP by SESSION interaction in temporal equivalence ratio ( $\chi^2(1) = 1.63$ ,  $p = 0.20$ ), VAS-visibility scores ( $\chi^2(1) = 0.01$ ,  $p = 0.96$ ) and VAS-ease scores ( $\chi^2(1) = 1.29$ ,  $p = 0.26$ ). The ability to achieve the temporal congruence between MI and actual execution was therefore preserved after immersion in both groups, hence highlighting that stress did not alter qualitative and

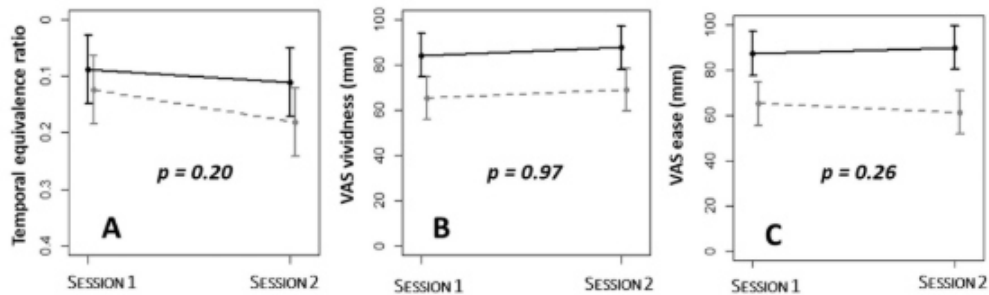


Fig. 6. Plot of the GROUP by TEST interaction with 95% confidence intervals for MI ability variables on the explicit MI task. A: MI ability indexed from temporal equivalence ratios. B: MI ability indexed from vividness VAS scores. C: MI ability indexed from ease VAS scores. Black lines correspond to the Control group. Grey dashed lines correspond to the Stress group.

subjective abilities to perform explicit MI (Fig. 6). Data revealed no main GROUP effect ( $\chi^2(1) = 1.71, p = 0.19$ ) on temporal equivalence ratio. A significant effect of SESSION was detected ( $\chi^2(3) = 8.45, p < 0.01, R_p^2 = 0.06$ ). Fitted estimation revealed that performance was deteriorated during SESSION 2 for both group ( $0.04 \pm 0.23, p < 0.05$ ).

#### 4. Discussion

Using a multidisciplinary approach, the present study aimed at evaluating the effect of stress on both implicit and explicit MI. The main finding of this pilot study showed that acute stress impaired implicit but not explicit MI, hence providing fruitful practical knowledge for designing efficient MI interventions in stressful situations.

The SECPT was efficient to induce an experimental acute stress in affecting both physiological and psychological aspects. During the SECPT, the heart rate, the salivary cortisol concentration and subjective stress increased, which is characteristic of stress answer (Contrada and Baum, 2010). Specifically, our result revealed a significant increase of salivary cortisol at 23 min post-SECPT, reflecting the long-lasting activation of the HPA axis in the stress group. As MI tasks were performed between 10 and 23 min after the SECPT, we assume that this assessment period allowed to relevantly test MI abilities during or just before the theoretical peak of cortisol secretion (Buchanan et al., 2006; Duncko et al., 2009; Schwabe et al., 2008; Wiemers et al., 2019). Surprisingly, tonic EDA remained unchanged during and after immersion. Stress answer usually involves a quick answer of sympathetic activity characterized by an increase of EDA. This unexpected finding might be explained either by the cold temperature induced specifically on feet (instead of hands) or by the additional social evaluation aspect (Buchanan et al., 2006; Santarcangelo et al., 2013).

The first original finding of the present work showed that stress affected the accuracy of implicit MI. Especially, stress effect was found to depend on the type of stimulus, as stressed participants made more errors than controls when judging hand laterality. Some studies suggested that tactile and sensorimotor integrations might help to resolve laterality judgment tasks (Conson et al., 2011; Viswanathan et al., 2012). As physical stressor was induced on feet, and laterality judgment of feet remained unaltered, it seems unlikely that the stress impact was purely dependent on deficiency in sensorimotor integration. We therefore suggest that the deleterious effects might be due to stress interactions with particular cognitive functions such as spatial treatment and memory. Such detrimental effect of stress on implicit MI performance is consistent with previous human and animal studies supporting that spatial treatment is selectively altered by stress (Shackman et al., 2006; Woodson et al., 2003). For instance, Shackman et al. (2006) showed that participants stressed by means of non-invasive shocks underperformed the encoding of a set of letter locations. The

authors suggested that brain regions involved in both stressful situations and visuospatial working memory process might be in competition (Shackman et al., 2006). Therefore, we suggest that the stress answer and the spatial processing function of the hippocampus were in competition, hence affecting implicit MI performance in the stress group.

Based on the main role of the hippocampus to connect new memories with emotions (Davidson et al., 2000), numerous investigations repeatedly showed its involvement in stress answers (Dedovic et al., 2009b; Dalla et al., 2009; Kim and Diamond, 2002). Interestingly, the hippocampus is also involved in spatial and long-term memory processes (Burgess et al., 2002; Catani et al., 2013). Neurofunctional studies even reported that the hippocampus is specifically activated during imagery of spatial environment or MI of locomotion (Bird et al., 2010; Sacco et al., 2006). Our implicit MI task required the recall of visual and kinesthetic information to elaborate a mental image, which was then mentally rotated to match with the presented stimulus. To do so, visuospatial working memory ability underpinned by the prefrontal cortex and the hippocampus should be preserved (Burgess et al., 2002). Hippocampus exhibits a high level of glucocorticoids receptors which makes it especially vulnerable to the increase of cortisol during stress (Wingenfeld and Wolf, 2014). During a psychosocial stress, a decrease of activation in the hippocampus has already been observed, and was positively correlated with the magnitude of the cortisol response (Dedovic et al., 2009a, 2009b). Here, we hypothesize that high level of cortisol could have decreased hippocampus activation, hence affecting implicit MI performance in the stress group. Unfortunately, our protocol did not allow testing direct correlations between levels of cortisol and MI performances, due to the tasks randomisation and the absence of cortisol assessments during each task. Still, correlations are difficult to observe (Shields et al., 2019), as cortisol and performance relationship might be non-linear with respect to some models involving a U-inverted relationship, where medium level of stress is optimum (Lupien et al., 1999, 2007; Salehi et al., 2010). Finally, our data showed that stress did not alter the perceived difficulty of implicit MI as both groups judged the mental rotation task at the same level of difficulty. This result emphasises that stress, even when altering performances, may not affect judgment of task complexity. Further researches should explore in greater details the neurofunctional substrates and signalling pathways underpinning the effect of stress on implicit MI paradigms. More specifically, future studies characterizing in greater details the cortisol secretion through multiple assessments might contribute to better understand the relationship between cortisol and MI performances.

The second main finding of the present study is that explicit MI was not affected by acute stress. Especially, stressed participants maintained their ability to achieve temporal equivalence between MI and physical movements. Furthermore, the subjective assessment of vividness and

easiness to produce mental image of the movement did not differ between the stress and control groups. When applied in sport and clinical contexts, both duration (i.e. temporal equivalence) and spatial features (i.e. vividness) of MI should be considered as influencing each other. For instance, participants may preserve the temporal congruence between imagined and actual movement times, but might form poor and inaccurate mental images of the action. Findings from the literature reveal that dissimilar stress effects (positive, none, or negative) on cognition are likely to depend on task difficulty. Performance decrement has usually been observed when the task was difficult and required complex flexible reasoning, whereas some gains were observed when the task was simple or well-rehearsed (Arnsten, 2009; Sandi, 2013). In the present study, both stress and control groups considered the explicit MI task as being simpler than the implicit. Thus, it might be possible that the subjective ease of explicit MI may have preserved performance from the harmful effects of stress. Subjective feelings of ease during explicit MI might come from (i) less demanding attentional processes, (ii) the repetitive sampling of afferent sensory information, and/or (iii) the absence of time-pressure. First, a conscious and voluntary engagement in explicit MI practice involved attentional focus on the task, which might have alleviated the attentional focus from the stressors (Vine et al., 2016). Second, the repetitive sampling of kinesthetic and visual information elicited during physical practice may have facilitated the (re)calibration and storage of the movement in short-term memory, thus promoting MI effectiveness (Malouin et al., 2013). Third, time pressure may have increased the difficulty of the task, and in contrast to implicit MI, performing explicit MI at a comfortable self-paced speed may have not induced a supplementary cognitive load constraint. Several factors can impact self-pace MI performances, such as task characteristics or circadian rhythms (Debarnot et al., 2012; Gueugneau et al., 2009). Here we controlled such factors as all testing sessions were scheduled in the afternoon were physical and MI practice durations of simple movements were similar (Gueugneau et al., 2009; Debarnot et al., 2012). In a context of early rehabilitation program, it is relevant to test if simple and accurate MI can be executed at a comfortable speed (Grangeon et al., 2012; Malouin et al., 2013; Mateo et al., 2018). Finally, as some researchers recommended to perform MI with closed eyes (Schuster et al., 2011), characterizing stress-effect on a similar closed eyes tasks will benefit a deeper understanding.

As explicit MI is known to substantially contribute to improve motor learning and performance (Feltz and Landers, 1983; Ferreira Dias Kanthack et al., 2016; Guillot and Collet, 2008), the present finding supports that spatiotemporal features of explicit MI are preserved during a stressful situation, which is practically important. For instance, during a stressful event such as sport competition or during rehabilitation context, where performing explicit MI right before physical action should maximize the ability to achieve peak performance. Further investigations are now encouraged to test whether acute stress may have a deleterious effect in more complex explicit MI situations.

Although present findings shed light on how and when MI should be practiced in stressful conditions, replication of this experiment on a larger sample and in an ecological environment is necessary. Furthermore, previous research showed that women tended to respond differently to an acute stressor due to their contraceptive usage and menstrual cycle (Kirschbaum et al., 1999). Although those variables were considered in the present study, few answers were collected, and a deeper hormonal information should certainly be included as a covariable in future research investigating stress effects on MI. Finally, our MI tasks were pseudo-randomized among participants and both tasks started 10 min following the end of the stressor, consequently only the long lasting effect (HPA axis) might be discussed, even though the exact quantity of cortisol during each task was not assessed. Further researches allowing to detect the distinct contribution of the SNS (HR and EDA) and HPA axis (cortisol) on implicit and explicit MI respectively should thus be of great value.

To conclude, this original pilot study is, to our knowledge, the first

demonstration that implicit MI ability is affected by acute stress, while explicit MI ability is preserved. Such persistence of explicit MI ability to stress reinforces the relevance of such type of practice in ecological stressful situations. Therefore, our findings underline that explicit, rather than implicit MI, could be a valuable technique in context of motor (re)learning, motor performance and during functional rehabilitation where stress is regularly present.

#### Author's contributions

SS, AG, CC and UD designed the study. SS, ES, CF, FDR carried out the study and statistical analyses. SS, AG, FDR and UD wrote the manuscript and all authors participated to the final version.

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

#### Declaration of competing interest

We have no competing interests.

#### References

- Arnsten, A.F.T., 2009. Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nat. Rev. Neurosci.* 10, 410–422. <https://doi.org/10.1038/nrn2648>.
- Bates, D., Mäeher, M., Bolker, B., Walker, S., Christensen, R., Singmann, H., Dai, B., Scheipl, F., Grothendieck, G., 2019. *Linear Mixed-Effects Models Using "Eigen" and S4*, R Package, Version 1.1-21. (March).
- Beck, A.T., Beamsderfer, A., 1974. Assessment of depression: the depression inventory. In: Pichot, P. (Ed.), *Psychological Measurements in Psychopharmacology*. Paris (Karger, Basel 1974), pp. 151–169.
- Bell, J.F., 2015. *Effects of Mild to Moderate Stress on Mental Rotation*. Walden University.
- Bird, C.M., Capponi, C., King, J.A., Doeller, C.F., Burgess, N., 2010. Establishing the boundaries: the hippocampal contribution to imagining scenes. *J. Neurosci.* 30, 11688–11695. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0723-10.2010>.
- Boonstra, A.M., De Vries, S.J., Veenstra, E., Tepper, M., Feenstra, W., Otten, E., 2012. Using the Hand Laterality Judgement Task to assess motor imagery: a study of practice effects in repeated measurements. *Int. J. Rehabil. Res.* 35, 278–280. <https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e3283355dd1e>.
- Buchanan, T.W., Tranel, D., Adolphs, R., 2006. Impaired memory retrieval correlates with individual differences in cortisol response but not autonomic response. *Learn. Mem.* 13, 382–387. <https://doi.org/10.1101/lm.206306>.
- Burgess, N., Maguire, E.A., O'Keefe, J., 2002. The human hippocampus and review spatial and episodic memory. *Neuron* 35, 625–641.
- Butts, K.A., Weinberg, J., Young, A.H., Phillips, A.G., 2011. Glucocorticoid receptors in the prefrontal cortex regulate stress-evoked dopamine efflux and aspects of executive function. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 18459–18464. <https://doi.org/10.1073/pnas.1111746108>.
- Buyssse, D.J., Reynolds, C.F., Monk, T.H., Berman, S.R., Kupfer, D.J., 1989. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res.* 28, 193–213. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(89\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4).
- Cannon, W.B., 1935. Stresses and strains of homeostasis. *Am J Med Sci* 189, 13–14.
- Catani, M., Dell'Acqua, F., Thiebaut de Schotten, M., 2013. A revised limbic system model for memory, emotion and behaviour. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 37, 1724–1737. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.07.001>.
- Champely, S., Ekstrom, C., Dalggaard, P., Gill, J., Weibezahl, S., Anandkumar, A., Ford, C., Volcic, R., De Rosario, H., 2018. *Power Functions for Power Analysis*, Version 1.2-2, R Package 1–22.
- Cohen, S., Kessler, R.C., Gordon, L.U., 1997. *Strategies for measuring stress in studies of psychiatric and physical disorders*. In: *Measuring Stress: A Guide for Health and Social Scientists*. Oxford University Press, New York, pp. 3–26.
- Conson, M., Mazzarella, E., Trojano, L., 2011. Self-touch affects motor imagery: a study on posture interference effect. *Exp. Brain Res.* 215, 115–122. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2877-7>.
- Contrada, R.J., Baum, A., 2010. *The Handbook of Stress Science: Biology, Psychology, and Health*. Springer P. ed, New York.
- Dalla, C., Whetstone, A., Hodes, G., Shors, T., 2009. Stressful experience has opposite effects on dendritic spines in the hippocampus of cycling versus masculinized females. *Neuroscience Letters* 449, 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.10.051>.
- Dallman, M.F., Hellhammer, D., 2010. Regulation of the hypothalamo-pituitary-adrenal axis, chronic stress, and energy: the role of brain networks. In: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science: Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 11–37.
- Davidson, R.J., Jackson, D.C., Kalin, N.H., 2000. Emotion, plasticity, context, and regulation: perspectives from affective neuroscience. *Psychol. Bull.* 126, 890–909. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.6.890>.
- Debarnot, U., Valenza, G., Champely, S., Scilingo, E.P., Rossi, D. De, Guillot, A., 2011. Motor imagery effectiveness for mirror reversed movements. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 11, 22–31. <https://doi.org/10.3758/s13415-010-0008-8>.

- Deharnot, U., Sahraoui, D., Champely, S., Collet, C., Guillot, A., 2012. Selective influence of circadian modulation and task characteristics on motor imagery time. *Res. Q. Exerc. Sport* 83, 1–9. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599879>.
- Dedovic, K., D'Aguiar, C., Pruessner, J.C., 2009a. What stress does to your brain: a review of neuroimaging studies. *Can. J. Psychiatr.* 54, 6–15.
- Dedovic, K., Rexroth, M., Wolff, E., Duchesne, A., Scherling, C., Beaudry, T., Lue, S.D., Lord, C., Engert, V., Pruessner, J.C., 2009b. Neural correlates of processing stressful information: an event-related fMRI study. *Brain Res.* 1293, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.06.044>.
- Dolfen, N., King, B.R., Schwabe, L., Swinnen, S., Alboury, G., 2019. Glucocorticoid response to stress induction prior to learning is negatively related to subsequent motor memory consolidation. *Neurobiol. Learn. Mem.* 158, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.01.009>.
- Dowle, M., Srinivasan, A., Gorecki, J., Chirico, M., Stentsenko, P., Short, T., Lianoglou, S., Antonyan, E., Bomsch, M., Parsonage, H., Ritchie, S., Ren, K., Tan, X., Saporta, R., 2019. Extension of "Data.Frame", Version 1.12.18, R Package.
- Driskell, J.E., Copper, C., Moran, A., 1994. Does mental practice enhance performance? *J. Appl. Psychol.* 79, 481–492.
- Duncko, R., Johnson, L., Merikangas, K., Grillon, C., 2009. Working memory performance after acute exposure to the cold pressor stress in healthy volunteers. *Neurobiol. Learn. Mem.* 91, 377–381. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2009.01.006>.
- Evans, L., Hare, R., Mullen, R., 2006. Imagery use during rehabilitation from injury. *J. Imag. Res. Sport Phys. Act.* 1. <https://doi.org/10.2202/1932-0191.1000>.
- Felz, B., Landers, D., 1983. The effects of mental practice on motor skill learning and performance: a meta-analysis. *J. Sport Psychol.* 5, 25–57.
- Ferreira Dias Kanthack, T., Guillot, A., Ricardo Altimari, L., Nunez Nagy, S., Collet, C., Di Rienzo, P., 2016. Selective efficacy of static and dynamic imagery in different states of physical fatigue. *PLoS One* 11, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149654>.
- Grangeon, M., Revol, P., Guillot, A., Rode, G., Collet, C., 2012. Could motor imagery be effective in upper limb rehabilitation of individuals with spinal cord injury? A case study. *Spinal Cord* 00, 1–6. <https://doi.org/10.1038/sc.2012.41>.
- Gueugneau, N., Mauvieux, B., Papaxanthis, C., 2009. Circadian modulation of mentally simulated motor actions: implications for the potential use of motor imagery in rehabilitation. *Neurorehabil. Neural Repair* 23, 237–245. <https://doi.org/10.1177/1545968308321775>.
- Guillot, A., Collet, C., 2008. Construction of the Motor Imagery Integrative Model in Sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *Int. Rev. Sport Exerc. Psychol.* 1, 31–44. <https://doi.org/10.1080/17509840701823139>.
- Guillot, A., Collet, C., 2010. The Neurophysiological Foundations of Mental and Motor Imagery. Oxford University Press Inc, Oxford, New York.
- Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., Collet, C., 2012. Understanding the timing of motor imagery: recent findings and future directions. *Int. Rev. Sport Exerc. Psychol.* 5, 3–22. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2011.623787>.
- Hall, C.R., Martin, K.A., 1997. Measuring movement imagery abilities: a revision of the Movement Imagery Questionnaire. *J. Ment. Imag.* 21, 143–154.
- Harris, A.P., Holmes, M.C., de Kloet, E.R., Chapman, K.E., Seckl, J.R., 2013. Mineralocorticoid and glucocorticoid receptor balance in control of HPA axis and behaviour. *Psychoneuroendocrinology* 38, 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2012.08.007>.
- Heremans, E., Helsen, W.F., Feys, P., 2008. The eyes as a mirror of our thoughts: quantification of motor imagery of goal-directed movements through eye movement registration. *Behav. Brain Res.* 187, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2007.09.028>.
- Héu, S., Grégoire, M., Saimpont, A., Coll, M., Eugène, F., Michon, P., Jackson, P.L., 2013. The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 37, 930–949. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.017>.
- Hidalgo, V., Palopulos, M., Salvador, A., 2019. Acute psychosocial stress effects on memory performance: Relevance of age and sex. *Neurobiology of Learning and Memory* 157, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2018.11.013>.
- Holmes, P., Calmels, C., 2008. A neuroscientific review of imagery and observation use in sport. *J. Mot. Behav.* 40, 433–445. <https://doi.org/10.3200/JMBR.40.5.433-445>.
- Horne, J., Ostberg, O., 1977. Individual differences in human circadian rhythms. *Biol. Psychol.* 5, 179–190. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(77\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(77)90001-1).
- Hornhorn, T., Bretz, F., Westfall, P., Heiberger, R., Schuetzenmeister, A., Scheibe, S., 2020. Simultaneous Inference in General Parametric Models. Package "multcomp" January, 1–34.
- Jaeger, B.C., Edwards, L.J., Das, K., Sen, P.K., 2016. An R2 statistic for fixed effects in the generalized linear mixed model. *J. Appl. Stat.* 44, 1086–1105. <https://doi.org/10.1080/02664763.2016.1193725>.
- James, B., Collins, D., 1997. Self-presentation sources of competitive stress during performance. *J. Sport Exerc. Psychol.* 19, 17–35. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Jones, A.L., Charlesworth, J.F., Hendra, T.J., 2000. Patient mood and carer strain during stroke rehabilitation in the community following early hospital discharge. *Disabil. Rehabil.* 22, 490–494. <https://doi.org/10.1080/096382800413970>.
- Kim, J.J., Diamond, D.M., 2002. The stressed hippocampus, synaptic plasticity and lost memories. *Nat. Rev. Neurosci.* 3, 453–462. <https://doi.org/10.1038/nrn849>.
- Kirschbaum, C., Kudielka, B.M., Gaab, J., Schommer, N., Hellhammer, D.H., 1999. Impact of gender, menstrual cycle phase, and oral contraceptives on the activity of the hypothalamus-pituitary-adrenal axis. *Psychosom. Med.* 162, 154–162.
- Kudielka, B.M., Buske-Kirschbaum, A., Hellhammer, D.H., Kirschbaum, C., 2004. HPA axis responses to laboratory psychosocial stress in healthy elderly adults, younger adults, and children: impact of age and gender. *Psychoneuroendocrinology* 29, 83–98. [https://doi.org/10.1016/S0306-4530\(02\)00146-4](https://doi.org/10.1016/S0306-4530(02)00146-4).
- Lupien, S.J., Gillin, C.J., Hauger, R.L., 1999. Working memory is more sensitive than declarative memory to the acute effects of corticosteroids: a dose-response study in humans. *Behav. Neurosci.* 113, 420–430.
- Lupien, S.J., Maheu, F., Tu, M., Fiocco, A., Schramek, T.E., 2007. The effects of stress and stress hormones on human cognition: implications for the field of brain and cognition. *Brain Cogn.* 65, 209–237. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2007.02.007>.
- Malouin, F., Jackson, P.L., Richards, C.L., 2013. Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front. Hum. Neurosci.* 7, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00576>.
- Marstaller, L., Savage, G., Rich, A.N., Williams, M., Johnson, B.W., Sowman, P., Burianová, H., Tesan, G., 2013. Multimodal functional imaging of motor imagery using a novel paradigm. *Neuroimage* 71, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.01.001>.
- Mateo, S., Reilly, K.T., Collet, C., Rode, G., 2018. Descriptive pilot study of vividness and temporal equivalence during motor imagery training after quadriplegia. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 61, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.06.003>.
- McEwen, B., 2000. Effects of adverse experiences for brain structure and function. *Biol. Psychiatry* 48 (8), 721–731. [https://doi.org/10.1016/S0006-3223\(00\)00964-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3223(00)00964-1).
- Meugnot, A., Toussaint, L., 2015. Functional plasticity of sensorimotor representations following short-term immobilization of the dominant versus non-dominant hands. *Acta Psychol.* 155, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.11.013>.
- Miller, E.K., Cohen, J.D., 2001. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu. Rev. Neurosci.* 167–202.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., 2011. Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R Packag. Version 3.
- Qin, S., Hermans, E.J., Marle, H.F.J., Van, Loo, J., Fernández, G., 2009. Acute psychological stress reduces working memory-related activity in the dorsolateral prefrontal cortex. *Biol. Psychiatry* 66, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.03.006>.
- Richardson, A.E., VanderKaay Tomasulo, M.M., 2011. Influence of acute stress on spatial tasks in humans. *Physiol. Behav.* 103, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.03.019>.
- Sacco, K., Cauda, F., Cerliani, L., Mate, D., Duca, S., Geminiani, G.C., 2006. Motor imagery of walking following training in locomotor attention. The effect of "the tango lesson". *Neuroimage* 32, 1441–1449. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.05.018>.
- Salehi, B., Cordero, M.L., Sandi, C., Fe, P., 2010. Learning under stress: the inverted-U-shape function revisited. *Learn. Mem.* 17, 522–530.
- Sandi, C., 2013. Stress and cognition. *WIREs Cogn Sci* 4, 245–261. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00081-4>.
- Santarangelo, E.L., Paoletti, G., Chiavacci, L., Palombo, C., Carli, G., Varanini, M., 2013. Cognitive modulation of psychophysical, respiratory and autonomic responses to cold pressor test. *PLoS One* 8, 6–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075023>.
- Schuster, C., Hillfiker, R., Amft, O., Scheidhauer, A., Andrews, B., Butler, J., Kischka, U., Ertlin, T., 2011. How to do motor imagery: a systematic literature review on mi techniques in five different disciplines. *BMC Med.* 75, 1–35.
- Schwabe, L., Oitzl, M.S., Philippson, C., Richter, S., Bohringer, A., Wippich, W., Schachinger, H., 2007. Stress modulates the use of spatial versus stimulus-response learning strategies in humans. *Learn. Mem.* 14, 109–116. <https://doi.org/10.1101/lm.435807>.
- Schwabe, L., Haddad, L., Schachinger, H., 2008. HPA axis activation by a socially evaluated cold-pressor test. *Psychoneuroendocrinology* 33, 890–895. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.03.001>.
- Schwabe, L., Römer, S., Richter, S., Dockendorf, S., Bälak, B., Schächinger, H., 2009. Stress effects on declarative memory retrieval are blocked by a  $\beta$ -adrenoreceptor antagonist in humans. *Psychoneuroendocrinology* 34, 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.10.009>.
- Shackman, A.J., Sarinopoulos, I., Maxwell, J.S., Pizzagalli, D.A., Lavric, A., Davidson, R.J., 2006. Anxiety selectively disrupts visuospatial working memory. *Emotion* 6, 40–61. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.1.40>.
- Shaffer, J.P., 1986. Sequentially rejective test multiple procedures. *J. Am. Stat. Assoc.* 81, 826–831.
- Shields, G.S., Sazma, M.A., Yonelinas, A.P., 2016. The effects of acute stress on core executive functions: a meta-analysis and comparison with cortisol. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 68, 651–668. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.06.038>.
- Shields, G., Rivers, A., Ramey, M., Michelle, M., Trainor, B., Yonelinas, A., 2019. Mild acute stress improves response speed without impairing accuracy or interference control in two selective attention tasks: implications for theories of stress and cognition. *Psychoneuroendocrinology* 108, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.06.001>.
- Shields, G.S., Sazma, M.A., McCallough, A.M., Yonelinas, A.P., 2017. The effects of acute stress on episodic memory: a meta-analysis and integrative review. *Psychol. Bull.* 143, 636–675. <https://doi.org/10.1037/bul0000100>.
- Sirigu, A., Duhamel, J.R., 1996. Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *J. Cogn. Neurosci.* 13, 910–919.
- Sirigu, A., Duhamel, J.-R., Cohen, L., Pillo, B., Dubois, B., Agid, Y., 1996. The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science (80- )* 273, 1564–1568.
- Smeets, T., Stijstermans, K., Gijzen, C., Peters, M., Jellic, M., Merckelbach, H., 2008. Acute consolidation stress enhances reality monitoring in healthy young adults. *Stress* 11, 235–245. <https://doi.org/10.1080/10253890701754076>.
- Spielberger, C., Gorsuch, R., Lushene, P., Vagg, P., Jacobs, A., 1983. Manual for the State Trait Anxiety Inventory (Form Y). Consulting Psychologists Press, Palo Alto, CA.
- Taverniers, J., Van Ruyseveldt, J., Smeets, T., Von Grumbkow, J., 2010. High-intensity stress elicits robust cortisol increases, and impairs working memory and visuo-spatial declarative memory in special forces candidates: a field experiment. *Stress* 13, 323–333. <https://doi.org/10.3109/10253891003642394>.
- Taverniers, J., Smeets, T., Lo Bue, S., Snylrot, J., Van Ruyseveldt, J., Pattyn, N., Von

- Grumbkow, J., 2011. Visuo-spatial path learning, stress, and cortisol secretion following military cadets' first parachute jump: the effect of increasing task complexity. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 11, 332–343. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0043-0>.
- Taverniers, J., Taylor, M.K., Smeets, T., 2013. Delayed memory effects after intense stress in special forces candidates: exploring path processes between cortisol secretion and memory recall. *Stress* 16, 311–320. <https://doi.org/10.3109/10253890.2012.721824>.
- Thomas, K.G.F., Laurance, H.E., Nadel, L., Jacobs, W.J., 2010. Stress-induced impairment of spatial navigation in females. *South African J. Psychol.* 40, 32–43. <https://doi.org/10.1177/008124631094000104>.
- Vine, S.J., Moore, L.J., Wilson, M.R., Martin, B.J., 2016. An integrative framework of stress, attention, and visuomotor performance. *Front. Psychol.* 7, 1671. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01671>.
- Viswanathan, S., Fritz, C., Grafton, S.T., 2012. Telling the right hand from the left hand: multisensory integration, not motor imagery, solves the problem. *Assoc. Psychol. Sci.* 1–10. <https://doi.org/10.1177/0956797611429802>.
- Vogel, S., Fernández, G., Joëls, M., Schwabe, L., 2016. Cognitive adaptation under stress: a case for the mineralocorticoid receptor. *Trends Cogn. Sci.* 20, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.12.003>.
- Westfall, P.H., 1997. Multiple testing of general contrasts using logical constraints and correlations. *J. Am. Stat. Assoc.* 92, 299–306. <https://doi.org/10.1080/01621459.1997.10473627>.
- Wiemers, U.S., Hamacher-Dang, T.C., Yonelinas, A.P., Wolf, O.T., 2019. Pre-encoding stress induced changes in perceived stress, blood pressure and cortisol are differentially associated with recollection and familiarity. *Brain Cogn.* 133, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.03.013>.
- Wingenfeld, K., Wolf, O.T., 2014. Stress, memory, and the Hippocampus. In: Szabo, K., Hennerici, M. (Eds.), *The Hippocampus in Clinical Neuroscience*. Karger, Basel, pp. 109–120. <https://doi.org/10.1159/000356423>.
- Wolf, O., 2017. Stress and memory retrieval: mechanisms and consequences. *Current Opinion in Behavioral Sciences* 14, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.12.001>.
- Woodcock, E.A., Greenwald, M.K., Khatib, D., Diwadkar, V.A., Stanley, J.A., 2019. Pharmacological stress impairs working memory performance and attenuates dorsolateral prefrontal cortex glutamate modulation. *Neuroimage* 186, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.017>.
- Woodson, J.C., Macintosh, D., Fleshner, M., Diamond, D.M., 2003. Emotion-induced amnesia in rats: working memory-specific impairment, corticosterone-memory correlation, and fear versus arousal effects on memory. *Learn. Mem.* 326–336. <https://doi.org/10.1101/lm.62903.et>.
- World Medical Association Declaration of Helsinki, 2003. *Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects*. 310. TAMA, pp. 2191–2194. <https://doi.org/10.3917/jib.151.0124>.

#### 2.1.2.4. Conclusion

Cette étude cherchait à caractériser l'impact du stress aigu sur les capacités d'imagerie explicite (tâche de pointage manuelle) et implicite (jugement de latéralité). Nos résultats montrent que les performances d'imagerie implicite ont été détériorées par un stress aigu alors que les performances d'imagerie explicite sont restées intactes (Fig. 29). Spécifiquement, ces résultats ont montré une augmentation du nombre d'erreurs dans le groupe stress sur la tâche de jugement de latéralité des mains. Cette tâche d'imagerie implicite a nécessité un rappel d'informations visuelles et kinesthésiques pour élaborer une image mentale qui était ensuite tournée pour correspondre au stimulus présenté. Pour ce faire, la capacité de mémoire de travail visuospatiale sous-tendue par l'hippocampe devait être préservée (Burgess et al., 2002). L'hippocampe étant particulièrement vulnérable au stress, nous postulons qu'un niveau élevé de cortisol pourrait avoir diminué l'activation de l'hippocampe, et affecté la performance implicite.

Contrairement à la tâche implicite, la tâche explicite n'a pas été détériorée. Il est possible que la tâche explicite ait été trop facile pour être altérée par le stress. En effet, le niveau de difficulté des tâches semble être un facteur modérateur important, et seules les tâches de mémoire de travail difficiles sont impactées négativement par le stress (Shields et al., 2016). Le caractère facile de la tâche explicite pourrait venir de la répétition de la tâche (réalisée avant puis après le stress), d'une réafférence sensorielle d'informations kinesthésiques trop importantes (réalisation d'une pratique physique avant chaque essai d'imagerie), ou bien d'une gestuelle trop simple. Ainsi, déterminer les effets du stress sur des tâches d'imagerie explicite plus complexes restent nécessaires afin d'ajuster les modalités de réalisation du travail d'imagerie lors de situations stressantes.

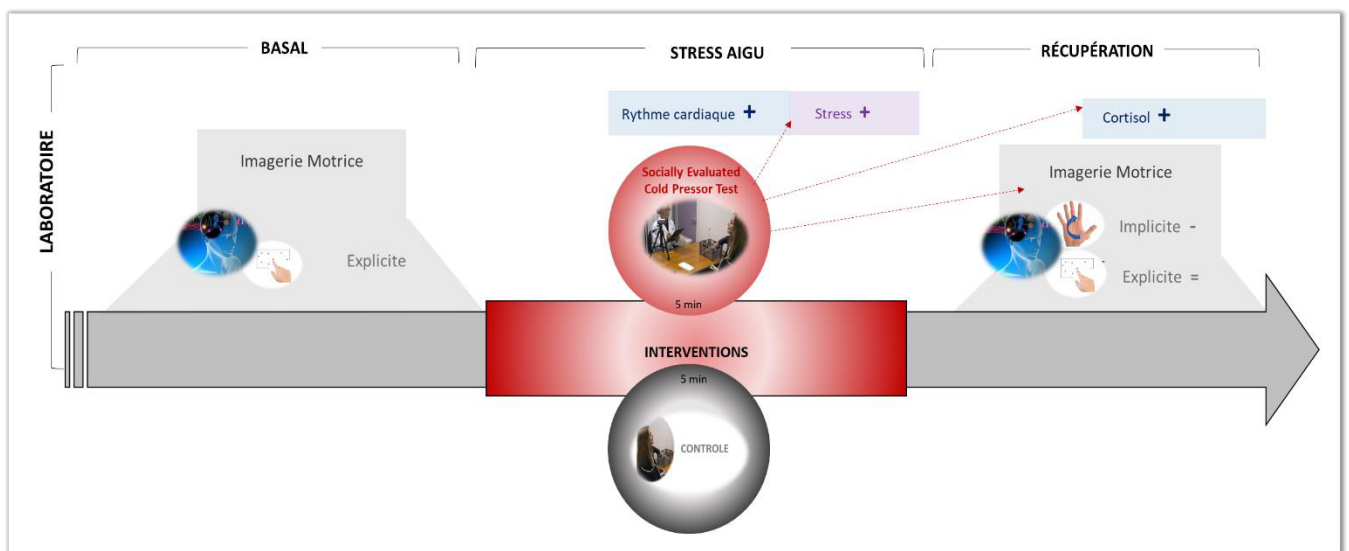


Figure 29. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 1. Le groupe stress a été comparé au groupe contrôle. Les performances explicites ont été évaluées subjectivement (VAS-vivacité et VAS-facilité de l'image) et semi-objectivement (isochronie). Aucun marqueur n'a été affecté par le stress. Les performances d'imagerie implicite ont été évaluées subjectivement (échelle de Likert évaluant la difficulté) et objectivement (temps de réaction, nombre d'erreurs). Le groupe stressé a effectué plus d'erreurs au cours de la tâche de jugement de latéralité des mains que le groupe contrôle. Les autres marqueurs n'étaient pas altérés.

### 2.1.3. Etude 2 : Impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie explicite

#### 2.1.3.1. Introduction

Alors que l'imagerie implicite relève plus d'une pratique spontanée visant ponctuellement à résoudre des problèmes du quotidien <sup>35</sup>, le travail explicite est davantage mis en place durant les programmes de rééducation et d'entraînement sportif (Malouin et

<sup>35</sup> Par exemple, lors d'une séance de bricolage, on peut se questionner sur la bonne angulation, le bon positionnement de la main afin de maintenir les objets utilisés. Ce questionnement se matérialisera par une visualisation de la main et du/des objets. Nous pouvons rapidement réaliser plusieurs types d'images afin de présélectionner le mouvement qui nous semble adéquat.

Richards, 2010). En effet, lors de ces entraînements, il est demandé aux individus de se concentrer sur des informations spécifiques (i.e. visualiser la position de leur index, ressentir le contact avec le support) en vue d'améliorer leurs performances motrices. Notre étude précédente suggère que ces capacités d'imageries explicites sont résistantes au stress (étude 1). En pratique, ce résultat impliquerait que l'on peut effectuer un travail d'imagerie explicite suite à des événements générateurs de stress. Dans cette étude, un stressor psychophysiologique était appliqué en amont de l'évaluation des capacités d'imagerie (étude 1). Toutefois, d'un point de vue écologique, l'étude des effets engendrés par un stressor psychologique concomitant à la pratique de l'imagerie permettrait d'élaborer des interprétations plus directes avec le stress généré par les évaluations sociales, comme lors des compétitions sportives ou des processus de rééducation (e.g. pression du personnel soignant). Par ailleurs, la simulation motrice réalisée dans ces contextes peut porter sur des mouvements présentant différents niveaux de difficulté et en lien avec la finalité et le niveau d'expertise du sujet. En effet les mouvements mentaux explorés dans le domaine du sport (exercice d'étirement, saut en hauteur, retour de service de tennis) et médicaux (saisie manuelle, mouvement de doigt, portée de poids) sont très diversifiés (Schuster et al., 2011). Par exemple, un patient pourra imaginer un simple mouvement lors des premières séances d'imageries et ce mouvement se complexifiera au cours des séances selon le principe de progressivité (Guillot et al., 2012; Malouin et al., 2013). Malouin et Richards (2010) proposent de commencer par imaginer des mouvements familiers que les individus savent d'ores et déjà effectuer physiquement. La diversité des mouvements sur lesquels peut porter l'imagerie et leur contexte d'utilisation, soulignent l'importance d'explorer les effets du stress sur les capacités d'imagerie explicite pour des actions présentant différents niveaux de complexité.

Dans ce contexte, nous avons réalisé une seconde expérience permettant d'approfondir la caractérisation du stress sur les capacités d'imageries motrices explicites. Les capacités ont été évaluées à travers de nombreux paramètres subjectifs, semi-objectifs et objectifs (EVA, équivalence temporelle, analyse des mouvements oculaires, entretiens d'explicitations etc). Cette nouvelle étude a permis de tester l'effet d'un stressor social sur une tâche d'imagerie explicite avec 3 niveaux de complexité différents (facile, moyen, difficile). Le stressor - *versus* une condition contrôle - a été délivré en même temps que la réalisation de l'imagerie. Nous

avons postulé que seule la tâche difficile, qui nécessite une charge mentale importante, serait impactée négativement par le stress (Shields et al., 2016).

### 2.1.3.2. Matériel et Méthodes

**Participants.** Cinquante individus volontaires en bonne santé, âgés de 18 à 31 ans (25 femmes, 24 ± 4 ans), ont participé à l'expérience. Les participants ont été recrutés via des annonces publiques diffusées majoritairement à l'Université Lyon 1. Les critères d'inclusion étaient : être droitier, avoir une vision normale ou corrigée, et ne pas avoir subi de blessure du bras droit au cours des 3 derniers mois. Tout d'abord, les participants ont reçu une note d'information détaillée et ont signé un formulaire de consentement. Puis les traits psychométriques (*PEN*), l'anxiété immédiate (*STAI-E*)<sup>36</sup> et les capacités d'imagerie motrice de base (mouvement du corp entier, *MIQ-R*) des individus ont été évalués (Fig. 30). Suite à une courte familiarisation avec la tâche d'imagerie explicite de pointage, les participants étaient répartis dans deux groupes (stress n=25 ou contrôle n=25). Puis, la tâche d'imagerie explicite complète était réalisée afin de déterminer l'impact des interventions (stress *versus* contrôle) sur les capacités d'imagerie explicite.

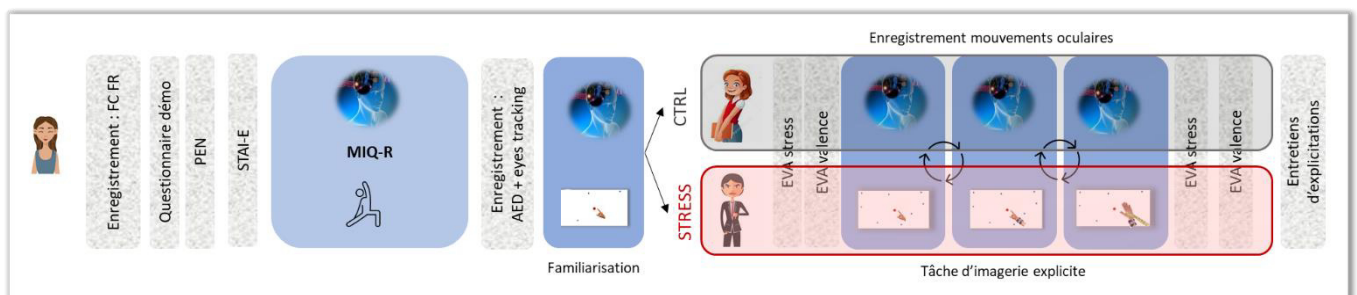


Figure 30. Design expérimental de l'étude 2. FC : Fréquence cardiaque. FR : fréquence respiratoire. *MIQ-R* : *Movement Imagery Questionnaire Revised*. AED : activité électrodermale. PEN : peur de l'évaluation négative, *STAI-E* : inventaire d'anxiété état. CTRL : contrôle. EVA : échelle visuelle analogique. Le groupe stress a subi un stress basé sur une évaluation sociale.

**Tâche d'imagerie explicite.** Les sujets ont réalisé un paradigme classique de tâche de pointage manuel (Lanata et al., 2020; Lorey et al., 2010; Mateo et al., 2018). La tâche de pointage séquentielle issue de l'étude précédente a été informatisée (Fig. 31). Les participants étaient assis devant un écran d'ordinateur, une cible rouge située au centre de l'écran pour indiquer le départ et l'arrivée de la séquence. Durant la pratique physique, les sujets avaient pour consigne de faire glisser leur doigt en réalisant des allers-retours de la cible rouge vers chaque

<sup>36</sup> Pour plus de détails, voir chapitres : les marqueurs et outils de mesures du stress aigu physiologique, et : les modérateurs individuels du stress.



cible bleue (identifiées par des lettres), selon un ordre alphabétique. Le mouvement devait être effectué à une vitesse confortable et les consignes étaient de focaliser l'attention sur les sensations liées aux mouvements et d'observer la main exécutante. Par la suite, les participants devaient répéter mentalement la séquence motrice en combinant les modalités visuelles (visualiser sa main et son doigt), kinesthésiques (musculaire et articulaire) et tactiles. Pendant les deux types de pratiques (réelle et imaginée), les participants devaient dire à haute voix "Go" lorsqu'ils débutaient la séquence et "Stop" lorsqu'ils la terminaient.

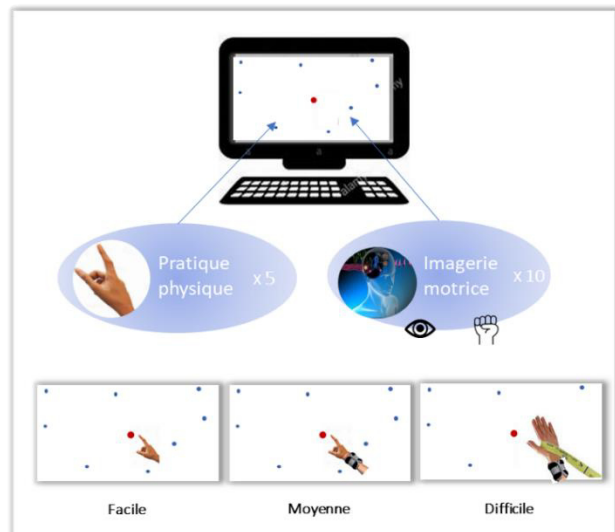


Figure 31. Tâche d'imagerie explicite réalisée : tâche de pointage séquentielle. Huit cibles périphériques bleues, identifiées par des lettres, étaient situées autour de la cible centrale rouge à une distance variable de 8 à 30 cm. Les participants devaient placer leur index droit sur la cible rouge, puis ils effectuaient un mouvement de pointage aller-retour en glissant leur doigt de la cible rouge aux cibles périphériques, en suivant l'ordre alphabétique et à leur rythme.

Les durées réelles et imaginées étaient enregistrées à l'aide d'un chronomètre (1/100 seconde, XL-013 anytime®). Pour la familiarisation, 3 cibles bleues étaient présentées et la tâche réelle comprenait 6 cibles. Pour les sessions de pratique réelle et imaginée, les participants gardaient les yeux ouverts.

La tâche d'imagerie motrice proposait 3 niveaux de complexité différents (Fig. 31) :

- Pointage séquentiel (niveau facile)
- Pointage séquentiel + poids (1 kg) lesté au poignet (niveau moyen)
- Pointage séquentiel + poids (1 kg) lesté au poignet + résistance (niveau difficile).

L'ajout d'un poids est fréquemment utilisé dans la littérature dans le but d'augmenter la difficulté d'une tâche d'imagerie (Cerritelli et al., 2000; Debarnot et al., 2012). Chaque condition comprenait 5 essais réels suivis de 10 essais d'imagerie motrice. L'ordre des conditions des 3 difficultés d'imagerie était pseudo-aléatoire. La qualité des représentations mentales a été évaluée à l'aide de mesures objectives, semi objectives et subjectives. Pour chaque tâche, les participants ont évalué la qualité de leurs images visuelles et kinesthésiques selon une EVA de 10 cm (0 : absolument pas d'image/de sensations ; 10 : images/sensations extrêmement claires). Les ratios d'équivalences temporelles ont également été calculés  $(\text{abs}(\text{imagerie}/\text{physique}-1) * 100)$ . Ce ratio permet d'estimer l'équivalence temporelle

entre les mouvements réels et imaginés (McInnes et al., 2016) ; plus le ratio est proche de zéro plus les caractéristiques temporelles du mouvement sont respectées. Enfin, les variations de l'activité électrodermale (MLT116f GSR Finger Electrodes, ADInstruments®, Duedin, New Zeland) et les patterns d'exploration visuelles ont été enregistrés (Tobii Pro Lab X2-60, Eye Tracker system) pour chaque essai d'imagerie. Les patterns d'explorations visuelles ont

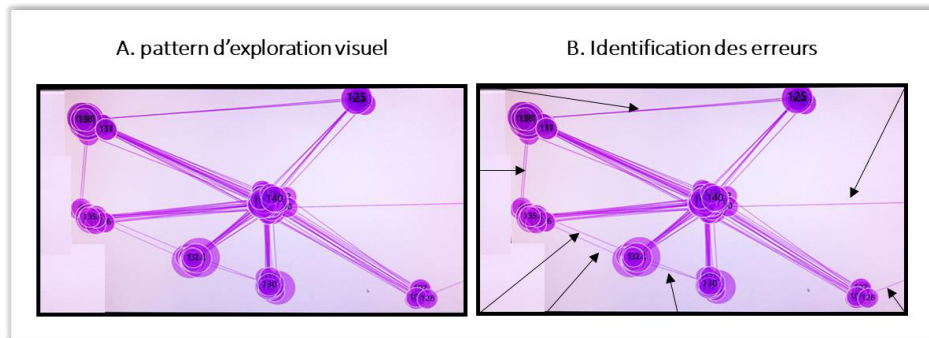


Figure 32. Méthode de détermination du nombre d'erreurs de mouvement oculaire durant la tâche d'imagerie motrice. L'illustration montre la superposition des patterns d'exploration visuelle enregistrés au cours des 10 essais d'imagerie motrice. (A) Exemple de pattern d'exploration d'un individu pour la condition d'imagerie explicite facile. (B) Identification des erreurs notifiées par les flèches noires. Ces erreurs montrent que durant certains essais le participant ne revenait pas à la cible centrale rouge mais allait directement entre deux cibles bleues. Pour chaque enregistrement, l'identification du nombre d'erreurs était évaluée par deux investigateurs aveugles aux hypothèses de travail.

notamment permis d'évaluer le nombre d'erreurs de mouvements oculaires (déviation de la cible, regard porté vers une zone vide d'information ou en direction d'une tierce personne avec laquelle il n'y avait aucune interaction durant l'imagerie (Fig. 32).

**Induction du stress.** Les participants étaient répartis dans une des deux conditions expérimentales (stress *versus* contrôle). L'induction de stress utilisée était une version modifiée et adaptée du *TSST* (Kirschbaum et al., 1993). Pour chacune des conditions, l'expérimentateur annonçait qu'une tierce personne allait entrer dans la salle expérimentale pour s'installer à proximité du participant (Fig. 33).

Dans la condition stress, la personne était présentée comme étant la supérieure hiérarchique de l'expérimentateur. L'expérimentateur expliquait aux participants que cette personne venait évaluer leurs capacités à réaliser la suite de l'expérience, sans qu'il n'y ait d'interactions pendant la tâche d'imagerie ou de pratique physique. L'expérimentateur précisait également que l'expérience serait filmée puis ensuite visionnée par un expert en imagerie motrice, qui évaluerait leur comportement verbal et non-verbal. Après ces annonces, la supérieure entrait et adoptait un comportement froid, demandait aux participants d'exécuter une tâche de

calcul mental difficile durant 2 minutes. Les participants réalisaient ensuite la tâche d'imagerie explicite (i.e. composée des 3 niveaux de complexité). Pendant ces tâches, la supérieure avait pour consigne d'observer régulièrement le participant et d'appuyer avec insistance sur les touches d'un ordinateur, mimant ainsi une prise de note sur les faits et gestes du participant.

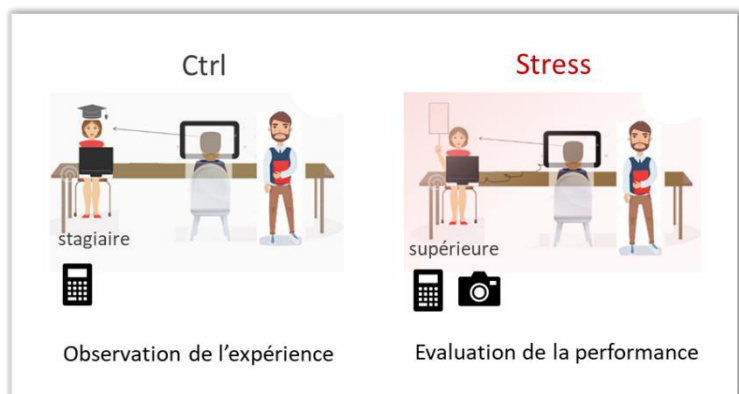


Figure 33. Protocole d'induction du stress *versus* condition contrôlée. Le stresser est une évaluation sociale concomitante aux tâches d'imagerie motrice. La supérieure et la stagiaire s'installaient au même endroit à une distance d'environ 1m30 du participant (en face, légèrement latéralisé) de façon à ce que la personne soit bien visible par le participant.

Dans la condition contrôle, l'expérimentateur présentait l'individu comme une stagiaire du laboratoire qui venait simplement observer le déroulement de l'expérience. Suite à l'entrée de la stagiaire, les participants devaient exécuter une tâche de calcul mental facile durant 2 minutes. Durant les tâches d'imagerie, la stagiaire avait un comportement neutre, s'installait au même endroit, faisait semblant de travailler sur son ordinateur, et regardait de temps en temps le participant.

**Mesure du stress.** Différents paramètres physiologiques ont été enregistrés en continu : fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, dépense énergétique (HexoskinTM; Carre Technologies Inc., Montréal, Canada). Nous avons calculé les moyennes de ces paramètres à différents temps de l'expérience : niveau basal, après l'entrée de la supérieure hiérarchique/stagiaire, et pendant chacune des conditions d'imagerie. Après l'induction du stress, soit juste avant les 3 tâches d'imagerie, le niveau de stress immédiat et la valence émotionnelle de ce stress ont été évalués sur des EVA de 10 cm, pour tous les participants <sup>37</sup>.

**Analyses statistiques préliminaires.** Nous avons utilisé des modèles linéaires pour évaluer l'effet de la session expérimentale sur les variables dépendantes quantifiant le stress (EVA-stress, EVA-valence). Pour ces scores, nous avons pris en compte le TEMPS (PRE IMAGERIE, POST IMAGERIE) et le GROUPE (CTRL, STRESS) avec un terme d'interaction comme effets fixes. Pour les variables dépendantes quantifiant la performance en imagerie motrice (EVA-visuelle, EVA-

<sup>37</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : les marqueurs et outils de mesures du stress aigu physiologique : les échelles visuelles analogiques.

kiné, équivalence temporelle, nombre d'erreurs durant la séquence de mouvement oculaire), nous avons entré le niveau de COMPLEXITE de la tâche (FACILE, MOYENNE, DIFFICILE) et le GROUPE (CTRL, STRESS) avec un terme d'interaction comme effets fixes. Les statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel libre R (3.6.1). Le seuil de signification statistique a été établi pour un taux d'erreur de type 1 de  $\alpha = 5\%$ .

### 2.1.3.3. Résultats préliminaires

**Induction du stress** (Fig. 34). Un effet GROUPE a été observé pour les données subjectives (EVA-stress  $\chi^2(1) = 34.32$ ,  $p < 0.001$  ; EVA-valence  $\chi^2(1) = 39.32$ ,  $p < 0.001$ ), montrant que comparativement au groupe contrôle, le groupe stress était plus stressé et jugeait ce stress de manière plus négative. Les données révèlent également un effet TEMPS (EVA-stress  $\chi^2(1) = 13.19$ ,  $p < 0.001$ ; EVA-valence

$\chi^2(1) = 16.75$ ,  $p < 0.001$ ) ainsi qu'une interaction significative GROUPE x TEMPS pour l'EVA-stress ( $\chi^2(1) = 7.09$ ,  $p = 0.008$ ). Aucune modification au cours du temps n'a été observé pour la valence émotionnelle (EVA-valence  $\chi^2(1) = 0.47$ ,  $p = 0.542$ ). Les données subjectives ont donc attesté l'induction d'un stress<sup>38</sup>.

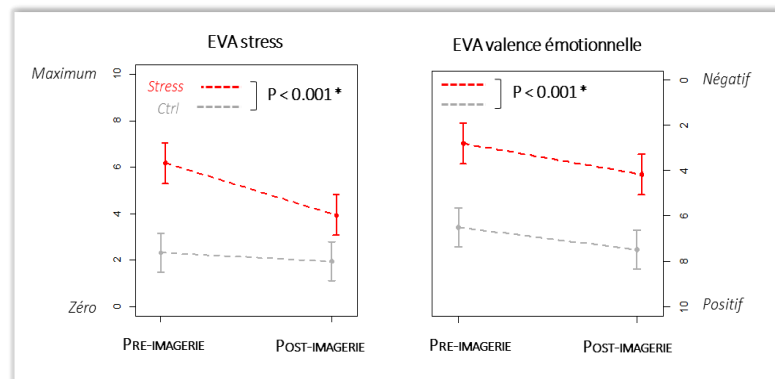


Figure 34. Evolution des niveaux de stress et de la valence émotionnelle avant et après les 3 tâches d'imagerie motrice explicites de pointage. Comparativement au groupe contrôle, le groupe stress présente des niveaux de stress subjectif plus élevés et juge que ce stress est négatif.

**Impact du stress sur la qualité de l'imagerie** (Fig. 35). Les données subjectives et semi-objectives ont montré une absence d'effet GROUPE (EVA-visuelle  $p = 0.959$  ; EVA-kiné  $p = 0.645$  ; équivalence temporelle  $p = 0.457$ ). Cependant, un effet GROUPE a été observé au niveau du nombre d'erreurs durant la séquence de mouvements oculaires, le groupe stress réalisant moins d'erreurs que le groupe contrôle ( $p = 0.007$ ). Les données n'ont révélé aucun effet principal de la COMPLEXITE (EVA-visuelle  $p = 0.904$ , EVA-kiné  $p = 0.363$ , équivalence temporelle  $p = 0.574$ , erreur balayage  $p = 0.798$ ), ni d'interaction GROUPE x COMPLEXITE

<sup>38</sup> Les données objectives de mesures du stress sont en cours d'analyses.

(EVA-visuelle  $p = 0.806$ , EVA-kiné  $p = 0.559$ , équivalence temporelle  $p = 0.613$ , erreur balayage  $p = 0.941$ ).

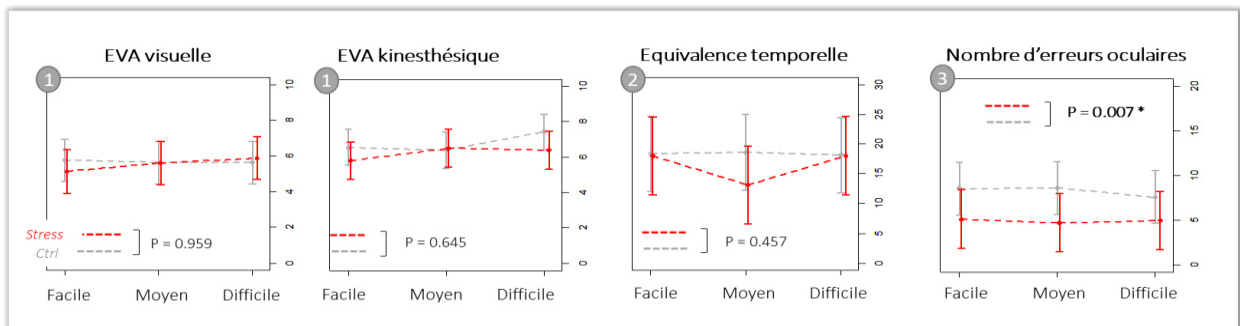


Figure 35. Effet de l'intervention (stress versus contrôle) sur les capacités subjectives, semi-objectives et objectives d'imagerie motrice explicite en fonction du niveau de complexité de la tâche (Facile, Moyen, Difficile). (1) Les capacités subjectives d'imagerie ne sont pas altérées par le stress. (2) L'équivalence temporelle est maintenue lors du stress. (3) Les individus du groupe stress ont réalisé moins d'erreurs oculaires.

#### 2.1.3.4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'impact d'un stress social sur une tâche d'imagerie explicite avec 3 niveaux de complexité différents (facile, moyen, difficile). Le stress était appliqué de manière concomitante à la pratique de l'imagerie. Contrairement à nos hypothèses, nous n'avons pas observé de détérioration de la tâche complexe pendant l'évènement stressant. Les résultats de cette étude montrent au contraire une absence d'effets du stress sur les marqueurs subjectifs et semi-objectifs de l'imagerie motrice. Les individus du groupe stress sont restés capables de produire des images motrices visuelles et kinesthésiques d'aussi bonne qualité que ceux du groupe contrôle. En outre, les résultats ont montré que l'équivalence temporelle était maintenue indépendamment de la complexité et du stress (Fig. 36). Fort de ces résultats, cette étude confirme que l'imagerie motrice explicite serait bien résistante au stress (Schlatter et al., 2020).

De manière inattendue, les analyses préliminaires du balayage visuel ont montré une diminution du nombre d'erreurs dans le groupe stress, comparativement au groupe contrôle, suggérant de meilleures capacités visuomotrices. Nos résultats sont en accord avec le modèle de Vine (2016) qui stipule que les capacités visuomotrices peuvent être maintenues lors d'un évènement stressant si un effort plus grand est investi. Ici nos résultats montrent que l'induction du stress social aurait

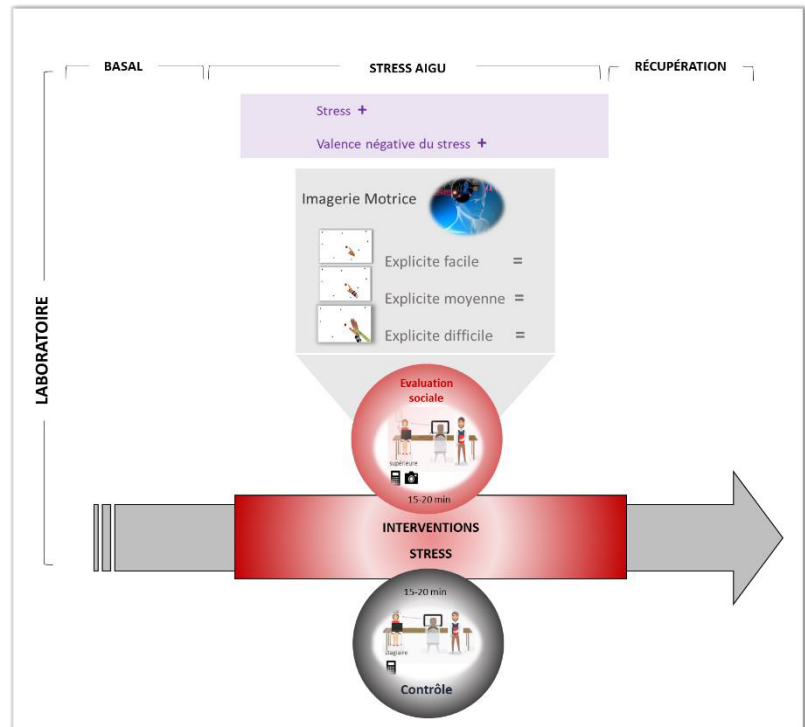


Figure 36. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 2. Le groupe stress a été comparé à un groupe contrôle. Les performances explicites ont été évaluées subjectivement (EVA-visuelle et EVA-kinesthésique), semi-objectivement (isochronie), et objectivement (nombre d'erreurs des mouvements oculaires). Le stress n'a pas eu d'impact délétère sur les performances d'imagerie, toutefois, une diminution du nombre d'erreurs de mouvement oculaires a été observé pour cette condition.

renforcé l'attention portée sur la tâche et amélioré le balayage visuel. Des futures études permettant de caractériser l'effort investi par des marqueurs subjectifs (EVA ou échelle de Likert) ou physiologiques, comme la dépense énergétique, permettront de tester cette hypothèse.

Les résultats des études 1 et 2 encouragent la pratique d'un travail d'imagerie explicite durant des évènements stressants, la capacité et la qualité de cette dernière n'étant pas altérées. Dans nos études nous avons exploré des mouvements impliquant des qualités de dextérités manuelles, ces mouvements mentaux peuvent être utilisés en rééducation et dans les sports de précisions (e.g. compétition de tir à l'arc et/ou de fléchettes). De futurs travaux permettant d'observer les effets du stress sur d'autres types de mouvements imaginés, polyarticulaires et plus complexes et à différentes vitesses permettraient d'explorer la généralisation de nos résultats (e.g. imagerie d'une séquence de mouvement complexe lors d'une compétition en gymnastique ou en escalade).

## 2.2. Remédiation du stress aigu

### 2.2.1. Etude 3 : Induction et remédiation du stress d'anticipation

#### 2.2.1.1. Introduction

Il est communément admis que les réponses de stress aigu surviennent dans des situations menaçantes pour l'ego, incontrôlables et imprévisibles (Dickerson et Kemeny, 2004). Cependant, nous arrivons à identifier par avance, dans notre vie quotidienne, des situations qui sont jugées comme stressantes. Ces identifications peuvent conduire à un stress d'anticipation, appelé aussi anxiété pré-événement ou anticipatrice (Hyun et al., 2018)<sup>39</sup>. Cette période d'anticipation reste relativement peu explorée et la grande diversité méthodologique observée dans la littérature rend la comparaison entre les études difficile (e.g. anticipation d'une menace physique, d'un discours, d'une évaluation sociale, d'événements stressants écologiques). La majorité des études utilisent l'anticipation d'un discours (comment évalues-tu tes capacités cognitives ? comment impressionnerais-tu quelqu'un lors d'un rendez-vous galant ? pourquoi es-tu un bon ami ?), cependant les modalités pratiques de l'induction ne sont pas toujours bien décrites et détaillées (Bernstein et Wood, 2018; Gonzalez-Bono et al., 2002; Sanchez et al., 2013; Starcke et al., 2008). Ainsi, les études sur le stress pourraient bénéficier de la mise en place d'une méthode d'induction robuste et précise du stress d'anticipation afin d'étudier spécifiquement cette période. Dans sa version originale, le TSST contient une période d'anticipation<sup>40</sup>. Même si certaines études ont caractérisé l'impact de cette période, elles n'avaient pas vocation à étudier exclusivement la période d'anticipation (Gaab et al., 2005; Juster et al., 2012; Pulooulos et al., 2020). Dans ce contexte, nous avons réalisé une nouvelle étude qui visait, dans un premier temps, à élaborer et évaluer un nouvel outil d'induction du stress d'anticipation (*Trier Social Anticipatory Stress Test, TSAS*). Comparativement à l'anticipation du TSST, le TSAS présente trois nouvelles caractéristiques : *i)* une menace sociale plus importante due à la présence d'une évaluation hiérarchique, *ii)* l'ajout d'un processus d'inquiétude (participant laissé seul pendant 2 min), *iii)* une mise en scène de la salle d'expérimentation (bureau pour le jury, caméra, stylos) et un comportement standardisé de l'expérimentateur (tonalité sérieuse, expérimentateur agissant comme s'il était intimidé par le futur jury).

---

<sup>39</sup> Pour plus de détails sur le stress d'anticipation, voir chapitre : définition du stress.

<sup>40</sup> Pour plus de détails sur le TSST, voir chapitre : *Trier Social Stress Test*.

L'état de la littérature à ce jour montre qu'un stress d'anticipation élevé impacterait les capacités cognitives des individus, leur bien-être, et l'ampleur de leurs réponses psychophysiologiques durant l'évènement stressant (Cain et al., 2011; Hyun et al., 2018; Juster et al., 2012; Preston et al., 2007; Pulooulos et al., 2020, 2018). Toutefois, cette période d'anticipation constitue un moment clé pour la mise en place de stratégies d'adaptations préventives du stress (Contrada et Baum, 2010; Neupert et al., 2016). Le VFC-RETRO est une technique efficace pour diminuer le stress et l'anxiété, cependant son efficacité lors d'un stress d'anticipation reste encore à démontrer (Goessl et al., 2017a). Le second objectif de ce travail était d'offrir une meilleure compréhension/caractérisation du stress d'anticipation et de ses effets par des mesures physiologiques, psychologiques, et cognitives et de déterminer si une courte session de VFC-RETRO permettait de diminuer la réponse psychophysiologique dès la période d'anticipation.

Des participants ont été exposés à une période de stress d'anticipation (15 minutes), pendant laquelle certains se sont vu délivrer un VFC-RETRO en temps réel alors que d'autres ont regardé une vidéo au contenu affectif neutre<sup>41</sup>. Les participants du groupe CONTROLE, sans stress d'anticipation, se sont vu délivrer un VFC-RETRO pendant une durée équivalente. Par la suite, tous les participants ont effectué une série de tâches cognitives évaluant les fonctions exécutives. La VFC (cohérence cardiaque, SDRR, RMSSD) et l'évolution de l'état psychologique ont été mesurées pendant la période d'anticipation (EVA stress, ratio d'évaluation cognitive REC, questionnaire d'activation/désactivation AD-ACL)<sup>42</sup>. Les effets des interventions ont également été évalués à posteriori (EVA diminution, EVA performance, EVA utilisation).

---

<sup>41</sup> Vidéo diffusée lors de l'expérience, sans son : [https://www.youtube.com/watch?v=BiNl1loshyA&list=LL\\_JdZWl6BojbAz04wiPGM1g](https://www.youtube.com/watch?v=BiNl1loshyA&list=LL_JdZWl6BojbAz04wiPGM1g).

<sup>42</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : outils de mesure du stress aigu psychologique.



## 2.2.1.2. Manuscript 2: Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress

Behaviour Research and Therapy 140 (2021) 103834



Contents lists available at ScienceDirect

Behaviour Research and Therapy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/brat](http://www.elsevier.com/locate/brat)



### Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: Psychological and physiological effects on anticipatory stress

Sophie Schlatter<sup>a,\*</sup>, Laura Schmidt<sup>b</sup>, Marc Lilot<sup>b,c,d</sup>, Aymeric Guillot<sup>a</sup>, Ursula Debarnot<sup>a,e</sup>

<sup>a</sup> Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de La Motricité, EA 7424, F-69622, Villeurbanne, France

<sup>b</sup> Research on Healthcare Performance (RESHAPE), INSERM U1290, Lyon, France

<sup>c</sup> Hôpital Louis Pradel, Hospices Civils de Lyon, Departments of Anaesthesia and Intensive Care, Lyon, France

<sup>d</sup> Centre Lyonnais d'Enseignement par Simulation en Santé (CLESS, medical simulation centre), University Claude Bernard Lyon 1, 69003, Lyon, France

<sup>e</sup> Institut Universitaire de France, France

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

Stress anticipation  
Stress coping  
Trier social stress test  
Cardiac coherence  
Heart rate variability

#### ABSTRACT

Anticipating a stressful situation involves psychophysiological reactions before the occurrence of the overt stress event. The current challenge in the stress domain is to characterize anticipatory stress reactions and how to effectively modulate them. The present study aimed to characterize the anticipation period and evaluate the benefits of a heart-rate variability biofeedback (BFB) intervention designed to manage anticipatory stress. Healthy participants were exposed to an anticipation stress period (15 min) during which they either practised BFB (STRESS + BFB,  $n = 15$ ) or watched a neutral video (STRESS + VIDEO,  $n = 14$ ). Anticipatory stress was effectively induced by the Trier Social Anticipatory Stress (TSAS) protocol, specifically designed for this study. Control participants, without anticipation stress, practised BFB for an equivalent time (CTRL + BFB,  $n = 15$ ). Subsequently, all participants performed a set of cognitive tasks assessing executive functions. Heart-rate variability (cardiac coherence, standard deviation of the R-R intervals, root mean square of successive difference measure) and the evolution of the perceived psychological state were measured during the anticipation period. Self-reported judgements of how the intervention influenced stress and performance were further assessed. The main result showed that BFB is a relevant proactive stress-coping method. Compared with the STRESS + VIDEO group, participants who practised BFB attained higher cardiac coherence scores. Post-intervention self-reported measures revealed that BFB contributed to reduce psychological stress and increase perceived levels of performance. Together, these findings provide practical guidelines for examining the stress anticipation period by means of the TSAS protocol.

#### 1. Introduction

Stress arises when environmental demands exceed the adaptive capacity of the organism, resulting in biological, psychological, and behavioural changes (Cohen et al., 1997; Contrada & Baum, 2010; Lazarus & Folkman, 1984; Schlatter, Guillot, et al., 2020; Shields et al., 2017). Acute stress responses mostly arise in ego-threatening, uncontrollable, and unpredictable situations (Dickerson & Kemeny, 2004), albeit that in many circumstances stressful situations can be detected before the occurrence of the actual stressor. For instance, one usually knows beforehand the schedule of an important meeting, exam, or sport competition. In such circumstances, an overall stress response corresponds to the early identification of the subsequent stressor (cognitive

appraisal), a period of anticipation (anticipatory stress), the occurrence of the stressful event (acute stress), and a period of stress recovery. An elevated stress response has been shown to affect well-being, health, and executive functions. Basically, when stress is not successfully regulated, a prolonged psychophysiological activation is likely to occur through the processes of anxiety and rumination (Brosschot et al., 2006). These psychological states are associated with increased activity of the cardiovascular, endocrinological, immunological, and neurovisceral systems, which promotes the evolution of numerous physiological diseases (Brosschot et al., 2006). Likewise, a frequent or extreme stress response increases the risk of developing burnout, post-traumatic stress syndrome, generalized anxiety disorders, or depression (Contrada & Baum, 2010).

\* Corresponding author. Inter-University Laboratory of Human Movement Biology, EA 7424, University Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France.  
E-mail addresses: [sophie.schlatter@univ-lyon1.fr](mailto:sophie.schlatter@univ-lyon1.fr) (S. Schlatter), [ursula.debarnot@univ-lyon1.fr](mailto:ursula.debarnot@univ-lyon1.fr) (U. Debarnot).

<https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103834>

Received 19 October 2020; Received in revised form 18 February 2021; Accepted 20 February 2021

Available online 3 March 2021

0005-7967/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

In addition to the impact of stress on well-being, its effect on cognition has been extensively studied, most of the findings converging towards a deterioration of working memory, inhibition, and cognitive flexibility (Duan et al., 2019; Plessow et al., 2012; Schoofs et al., 2008; Taverniers et al., 2010; Woodcock et al., 2019). Given the occurrence of anticipatory stress in our modern society, recent experimental research examining its effect on cognition showed a decreased performance in terms of attention (Cain et al., 2011), working memory (Hyun et al., 2018), and decision making (Preston et al., 2007; Starcke et al., 2008). These deleterious effects of stress on well-being and cognition emphasize the importance of exploring coping interventions during the anticipation period.

Studies have primarily investigated anticipatory stress by using specific paradigms, such as the anticipation of parachute jumps (Taverniers et al., 2011), talks (Nasso et al., 2019; Preston et al., 2007; Starcke et al., 2008), musical performance (Wells et al., 2012), or shocks (Cain et al., 2011). There is therefore no standardized stress anticipation induction method permitting reliable comparisons between the existing findings. The well-known Trier Social Stress Test (TSST) is a method of inducing an acute stress response through the confrontation of a psychosocial stressor. In its original version, the TSST includes an anticipatory period of 10 min prior to the stressful event (Kirschbaum et al., 1993). Although several studies reduced or even omitted the anticipation period (Carnevali et al., 2019; Duan et al., 2019; Guez et al., 2016; Ioannou et al., 2016; Kudielka et al., 2004), we believe that the method offers a relevant option for disentangling the anticipatory stress (Alexander et al., 2007; Gaab et al., 2005). In the present study, we used the Trier Social Anticipatory Stress (TSAS) protocol to specifically investigate the anticipatory stress period. The TSAS protocol reinforces the TSST by adding negative hierarchical social evaluation and leaving the participant alone. Such experimental conditions are expected to elicit stronger rumination processes and higher physiological activation (Brosschot et al., 2006; Dickerson et al., 2008; Dickerson & Kemeny, 2004).

The anticipation of stressful events is crucial, as it provides the opportunity to develop coping strategies, and the changes observed during anticipation are considered to be adaptive responses that allow appropriate behavioural, cognitive, and physiological adjustments to be made to deal with the future actual stressor (Contrada & Baum, 2010; Neupert et al., 2016; Pulpulos et al., 2018). Recently, numerous studies focused on the efficacy of non-invasive coping techniques such as biofeedback (Dillon et al., 2016; Plans et al., 2019; Schlatter, Therond, et al., 2020; Wells et al., 2012). Biofeedback procedures integrate various interventions that assess and display to the individual in real-time physiological parameters, such as skin conductance, cerebral activity, and breathing or heart rate. Thus, biofeedback enables individuals to be more conscious of their physiological parameters and assists in developing their control over their physiology (Subhani et al., 2018).

There is an increasing interest in the study of heart-rate variability, which characterizes beat-to-beat changes and indicates the organism's adaptability. High cardiac variability is positively correlated with numerous markers of health and stress resistance. On the contrary, reduced heart-rate variability has been associated with mental health problems, such as anxiety and depression, and with increased risk of cardiovascular diseases and mortality (Berry et al., 2014; De Witte et al., 2019; Gevirtz, 2013; Goessl et al., 2017; Shaffer et al., 2014). The heart-rate variability biofeedback (BFB) approach assesses and displays cardiac parameters, hence fostering conscious control of cardiac activity (De Witte et al., 2019). This BFB method, often paired with a paced breathing exercise, leads to an increase in variability through respiratory sinus arrhythmia (Leher et al., 2000; Shaffer et al., 2014). When the heart rate accelerates and decelerates in a harmonious way, the pattern of heart-rate variability is described as coherent. Therefore, cardiac coherence reflects a synchronized and sinusoidal heart rhythm, and describes the harmony in the oscillatory outputs of the regulatory systems (McCraty & Zayas, 2014; Shaffer et al., 2014). When BFB is

combined with slow relaxing breathing, a shift from the activation of the sympathetic to the parasympathetic branch of the central nervous system occurs that favours vagal regulation of cardiac activity, hence reducing physiological and psychological stress markers (Goessl et al., 2017; VanDiest et al., 2014).

Biofeedback has frequently been used after a stressful event to foster stress recovery (De Witte et al., 2019; Plans et al., 2019). However, using BFB during an anticipatory stress period may be more appropriate to decrease both anticipatory and acute stress responses and improve stress recovery. Despite recent interest in applying BFB before an actual stressor, experimental studies have not assessed the selective effectiveness of BFB for coping with stress anticipation (Prinsloo et al., 2011, 2013; Sherlin et al., 2009; Whited et al., 2014). Finally, there is no agreement on the optimal duration of BFB sessions (De Witte et al., 2019; Meyer et al., 2018; Prinsloo et al., 2011, 2013; Schäfer et al., 2018; Schlatter, Therond, et al., 2020; Sherlin et al., 2009; Whited et al., 2014). Some studies implemented BFB paradigms with repetitive training (from three days to five weeks), while others used short sessions ranging from 5 to 15 min. Biofeedback training presents important limits, as adherence and frequency of practice may be highly heterogeneous among individuals, and learning remains resource intensive and time consuming. Therefore, providing efficient short sessions appears to be an attractive alternative, although determining the optimal time intervention through physiological and psychological markers remains of critical importance for designing effective coping interventions.

Therefore, the present study aimed to (i) characterize the stress anticipation period using the Trier Social Anticipatory Stress (TSAS) test, and (ii) evaluate the effectiveness of a short session of heart-rate variability BFB as a proactive coping method. To address these questions, a randomized design assessed the effect of both stress manipulation and BFB interventions. Psychological states were assessed through the instantaneous assessment of stress, cognitive appraisal, and internal relaxation and tension. Physiological modifications were evaluated through the assessment of heart-rate variability parameters, while impacts on cognition were evaluated through a set of cognitive tasks. In addition, self-reported measures were used to determine the effects of intervention on overall stress diminution and subjective performance improvement. We hypothesized that the TSAS protocol would induce a psychophysiological anticipatory stress response. We further postulated that using BFB, during an anticipation stress period, could be an efficient option for reducing the anticipatory stress response and preventing cognitive dysfunction.

## 2. Material and methods

### 2.1. Participants

Forty-four healthy participants (mean  $\pm$  SD, 25.25  $\pm$  3.73 years old [range 18–36 years]; 22 women and 22 men) took part voluntarily in the experiment. For homogeneity in stress responses, participants with no to moderate depressive symptoms were included in the experiment (Beck Depression Inventory [BDI]-13 score < 15; Beck & Beck, 1972). Exclusion criteria were regular drug use, diagnosed psychological disorders or chronic disease, and medication use that could influence heart rate (e.g., beta-blockers, anti-anxiety medication). Participants were recruited through a public announcement at the Sport and Science department in the community of the University of Claude Bernard Lyon 1. All included participants were Caucasians. Each participant received a detailed informative note and provided a written consent form in agreement with the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2003), which was approved by the institutional review board of the University.

### 2.2. Experimental design

#### 2.2.1. Preliminary assessments

Several psychometric data were collected one week before the

experimentation to check homogeneity between groups with respect to anxiety trait (State-Trait-Anxiety Inventory [STAI]-Y-B; Spielberger et al., 1983), fear of social evaluation (Fear of Negative Evaluation [FNE]; Musa et al., 2004), and level of depressive symptoms (BDI-13; Beck & Beck, 1972). The unidimensional FNE scale included 30 items (Watson & Friend, 1969), the French version being of high convergent validity (Peur de l'évaluation négative [PEN]; Musa et al., 2004) and with acceptable internal consistency (coefficient of 0.94). Signs of depression were evaluated via the French short version of the BDI (BDI-13; Collet & Cottraux, 1986). The BDI-13 has been validated ( $r = 0.96$ ) in comparison with the 21-item inventory score (Beck & Beck, 1972) and produced a solid internal consistency ( $r = 0.88$ ), comparable factor structure (Leahy, 1992), as well as sufficient test-retest reliability (Speranza et al., 2005). The complete STAI (Spielberger et al., 1983) includes 40 items. Here, only the subscale for trait anxiety (20 items), which assesses the intensity of general anxiety, was applied in the French version (Inventaire d'Anxiété Situationnelle et de Trait d'Anxiété [IASTA-Y-B]; Bruchon-Schweitzer & Paulhan, 1993). The validated French version presents high test-retest reliability ( $r = 0.94$ ) as well as high internal consistency (Cronbach's  $\alpha = 0.91$ ). As age and body mass index might affect heart-rate variability and stress response might be affected by educational level, these demographic parameters were also assessed.

2.2.2. Experimental session

Participants were randomly assigned into one of three groups, following simple computerized randomization procedures. The

experimental paradigm involved either a period of stress anticipation or no-stress-anticipation (STRESS or CTRL, respectively), followed by a heart-rate variability BFB or a video intervention (BFB or VIDEO, respectively). Thus, participants were assigned into the STRESS + VIDEO ( $n = 14$ ), STRESS + BFB ( $n = 15$ ), or CTRL + BFB ( $n = 15$ ) groups. The experiment occurred in a quiet room with no distracting stimuli and was divided into three main periods: TSAS protocol, stress-coping intervention, and cognitive tasks (Fig. 1).

2.2.2.1. Trier social anticipatory Stress test (2 min). For the stress anticipation period, participants in the stress conditions underwent the TSAS protocol, which is a modified version of the anticipation period of the TSST (Kirschbaum et al., 1993). The most effective stressors are uncontrollable, unpredictable, and present a threat to the ego, the TSAS protocol reinforces those TSST characteristics by adding hierarchical evaluation and credibility of the scenario through a standardized staging (Appendix 2). The experimental room was equipped with an additional desk with two chairs, two pens and one camera, dedicated to the fake judging panel. First, Participants were informed that after a few minutes of a breathing exercise (STRESS + BFB) or video viewing (STRESS + VIDEO), a panel of two people would come to evaluate their performance on two tasks (one job interview and one mental arithmetic task, lasting 5 min each). For the mental arithmetic task, participants were informed that each error would be noticed, and that they would systematically have to restart the computation from the beginning after each error. Second, the panel members were always introduced as hierarchical superiors of the experimenter and were also emeritus professors and lecturers, who

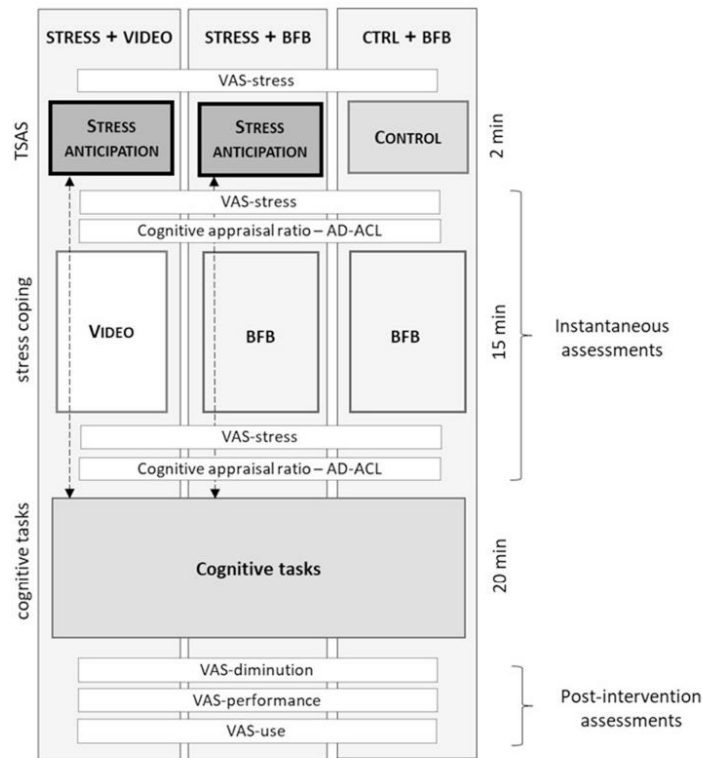


Fig. 1. Timeline of the experimental design. Note. The VAS-stress reported subjective stress assessments. The cognitive appraisal ratio was calculated as follows: VAS competences/VAS resources. The TSAS consisted in listening instructions of the Trier Social Anticipatory Stress protocol or neutral instructions. The Activation-Deactivation Adjective Check List (AD-ACL) corresponded to the subjective assessment of internal relaxation and tension. The BFB intervention required viewing in real-time cardiac parameters paired with a breathing exercise. The long-dashed arrows represent the (virtual) announced arrival of the panel.

would judge the quality of the presentation and the force of persuasion. The apprehension of a negative hierarchical social evaluation should elicit strong physiological activation (Dickerson et al., 2008; Dickerson & Kemeny, 2004). Participants were told that their performances would be video-recorded for further analysis by specialists interested in verbal and nonverbal behaviours. Finally, after giving these instructions to the participant, the experimenter left the room for one or 2 min, pretending to instruct the panel to prepare, as the evaluation session was about to begin. The participant was left alone during this time in order to remove the potentially reassuring link between the experimenter and the participant (a shift from the mere presence to the future negative social presence). This period was further expected to constrain the participant to assimilate task instructions, and elicit rumination processes associated with anticipatory stress (Brosschot et al., 2006; Dickerson & Kemeny, 2004).

For the control anticipation period, participants were simply informed that, after few minutes of a breathing exercise (CTRL + BFB), they were going to have a talk with the experimenter on movies or books they had seen or read recently. There was no additional desk. No performance analysis, panel, or video recording was ever mentioned.

Finally, all participants were also advised that they were expected to perform a set of different cognitive tasks during the experiment.

**2.2.2.2. Stress-coping interventions (15 min).** Once the experimenter returned to the room, all participants were hooked up with an ear pulse sensor. The device was connected to a computer via a USB module that continuously recorded cardiac coherence (emWavePRO®, HeartMath Technologies, Add Heart®) (McCraty et al., 2009). Then, participants were subjected to 15 min of heart-rate variability BFB intervention (STRESS + BFB and CTRL + BFB) or passively watched a neutral documentary video (STRESS + VIDEO). In order to be consistent with the soundless BFB intervention, the video was displayed without sound.

For BFB interventions, the experimenter briefly presented the visual interface, composed of the cardiorespiratory signal and the breathing cursor, displayed to the participant on a 17-inch computer screen (Fig. 2; emWavePRO® interface). Participants were then instructed to perform two cycles of maximal inhalation/expiration. The experimenter gave a standardized instruction indicating that the signal depicts instantaneous heart rate, and the more the signal represents a pretty and regular curve, the more they are in cardiac coherence. They were further informed that the immediate (coherence) and cumulative (achievement) coherence scores, as well as intervention's time, are displayed on the screen. Then, they were instructed to reach, through the help of the visual interface, the highest possible score of cardiac coherence. To do so, they were told to follow a standardized visual breathing cursor, leading the inspiration and expiration cycles at a rate of 6 breaths/min.

**2.2.2.3. Cognitive tasks (20 min).** Following these interventions, all participants performed a set of cognitive tasks assessing the main executive functions: set shifting, inhibition, flexibility, and working memory (Cristofori et al., 2019; Korte et al., 2002; Miyake et al., 2000; Stroop, 1992). The Wisconsin Card Sorting Test assessed shifting abilities. Participants guessed the implicit rule of association between cards (three criteria: shape, colour, and number of symbols), and the classification rules changed every 10 cards over the total of 60 trials, with a maximum response time of 10 s and feedback afterwards. The software PsyToolkit was used for data collection (Stoet, 2010, 2017). The primary outcome was the performance: (number of total errors – number of perseveration errors)/number of total errors. This proportion shows how

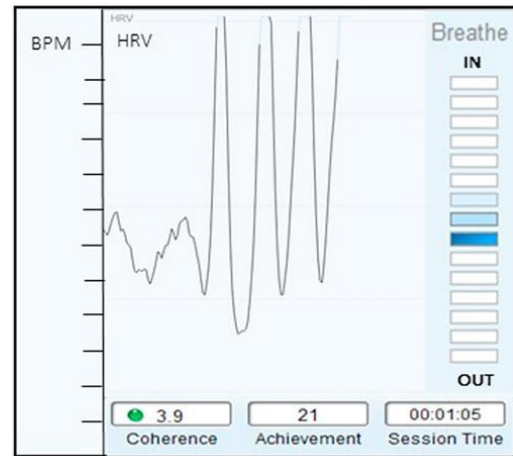


Fig. 2. BFB intervention: emWavePRO® visual interface.

*Note.* The BFB intervention required viewing in real-time cardiac parameters (left) paired with a standardized breathing exercise leading by a visual cursor (right). The curve draws their instantaneous heart rate. HRV: Heart Rate Variability. BPM: Battements per Minute. Immediate and cumulative coherence (achievement) were displayed. Participants had to breathe in and out with the cursor concurrently leading inspiration and expiration at a rate of 6 breaths/min.

often participants continued to apply the old rule compared with the total number of errors.

The Stroop Colour Words Interference test was used to assess inhibition through the assessment of the interference stress-score (Collet et al., 2005). Participants were presented with three sets of different stimuli (words in black, coloured small squares, and coloured words). The coloured words set included congruent and non-congruent options (e.g., “red” written in green). Participants had to respond to as many stimuli as possible in 90 s per set, and the primary outcome was the number of stimuli solved for each set (S1, S2, S3). A raw score was calculated as follows:  $S3 - (0.1651 * S1 + 0.48195 * S2 + 10.9254)$ , then the score was transposed into a performance score, distinguishing 11 categories ranging from 0 (very low) to 10 (high resistance) (Collet et al., 2005). This score measured how well participants were able to inhibit a non-relevant response according to their global response time, the highest score reflecting the highest inhibitory performance (Vanier, 1991).

The Verbal Fluency Test was used to assess working memory. Participants listed words for 2 min according to randomly selected categories (animals, fruits, furniture) that varied in difficulty. The primary outcomes were the total number of words (fluency) and the number of repeated words (repetition). Performance in working memory was calculated as follows:  $(\text{fluency} - \text{repetition}) / \text{fluency}$ . This ratio measured how many new words were contained in the total amount of found words and was therefore a relevant indicator of working memory abilities.

Finally, the Trail Letter-Making Test assessed cognitive flexibility. Participants were presented with two test sheets. They had to connect the randomly distributed stimuli with a pen as quickly as possible, either following the numbers in ascending order (part A: 1 to 2, 2 to 3, ... and so on) or following alternately the numbers and letters in alphabetic

order (part B: 1 to a, a to 2, 2 to b ...). Durations were recorded using a digital timer (1/100 s XL-013 anytime®). The primary outcome was the time taken to connect all items, and performance was calculated as follows: (time A – time B)/time A. This ratio represented the time difference between the simple (A) and the dual task (B), which required shifting abilities, in relation to the individual's own speed. The tasks' order was counterbalanced between each participant.

### 2.3. Dependent variables controlling stress anticipation and coping interventions

#### 2.3.1. Instantaneous psychometric measures

All participants rated on a Visual Analogue Scale (10 cm VAS; all questions are presented in Appendix 1) how stressful they experienced the immediate situation (VAS-stress) before and after the TSAS protocol, as well as after stress coping (Fig. 1). After the TSAS instructions and the subsequent stress-coping period, they further rated on a VAS-competences scale how they perceived the level of competence required to manage the upcoming situation and on a VAS-resources scale how they estimated their resources to perform well. From these scores, a ratio of cognitive appraisal was evaluated (VAS-competences/VAS-resources); a ratio equal to one indicated that the participant had as many resources as the situation required. Additionally, they filled out the Activation-Deactivation Adjective Check List [AD-ACL] after the TSAS protocol and stress-coping periods, assessing the evolution of their internal relaxation and tension (Thayer, 1967). The French version of the AD-ACL (Thayer, 1967) was used to assess the arousal states Energetic-Arousal and Tense-Arousal across 20 items. Such latter has a strong reliability and construct validity ( $r = 0.92$ ; Thayer, 1978), all subscales achieving good test-retest reliabilities ( $r = 0.79$ – $0.93$ ; Thayer, 1989).

#### 2.3.2. Autonomic nervous system measures

The autonomic nervous system activity was recorded by monitoring cardiac activity during the stress-coping period (EmWave Pro, HeartMath Technologies, Add Heart®). Heart-rate variability in both frequency (cardiac coherence) and temporal domains (standard deviation of the R–R intervals [SDRR]; root mean square of successive difference measure [RMSSD]) was assessed through the recording at 370 Hz of cardiac activity by the ear pulse device (EmWave Pro®, HeartMath Technologies, Add Heart®). The coherence score is an indication of the heart's rhythm considering the afferent cardiovascular input to the brain. Coherence is reflected by a synchronized and sinusoidal heart rhythm (Shaffer et al., 2014). The HeartMath Research Center assessed coherence by "identifying the maximum peak in the 0.04–0.26 Hz range of the heart-rate variability power spectrum, calculating the integral in a window 0.03 Hz wide, centred on the highest peak in that region, and then calculating the total power of the entire spectrum" (McCraty et al., 2009). The coherence ratio was then formulated as peak power/(total power – peak power) (Childre & Martin, 1999; McCraty et al., 2009). The trend of the instantaneous coherence score was based on this ratio and depicted during the 15-min intervention on a minute-by-minute basis. In addition, the cumulative coherence was calculated by the sum of each immediate cardiac coherence score during the 15-min intervention.

#### 2.3.3. Post-intervention self-reported measures

After the cognitive tasks, participants reported on three scales how well the intervention (BFB vs VIDEO) enabled them to reduce their stress (VAS-diminution) and influence their cognitive performances (VAS-

performance) (Appendix 1). They also reported how much they could use the intervention in their professional and/or personal life (VAS-use). The BFB participants further provided the optimal estimated time of treatment needed to feel well-prepared for an upcoming stressful event.

At the end of the experiment, all participants received a debrief according to ethical standards. When relevant, they were informed that no panel was about to come to judge their performance.

### 2.4. Statistical analysis

**Initial group homogeneity.** We investigated the existence of any initial GROUP effect on demographic and psychometric dependent variables (age, body mass index, education, IASTA-Y-B, FNE, BDI-13, VAS-stress basal) with one-way ANOVAs or Kruskal–Wallis tests. The difference in gender proportions within each group was assessed with a Pearson chi-squared test.

**Instantaneous psychometric.** We used linear mixed effects with a by-subject random intercept (*lme* function, *nlme* package; Pinheiro et al., 2011) to analyse the effect of the experimental session on the dependent variables quantifying stress. Visual inspection of the residual plots did not reveal any obvious deviation from homoscedasticity or normality. To investigate the instantaneous effect of GROUP on situational perception variables (VAS-stress, cognitive appraisal ratio, internal relaxation, internal tension), we entered TIME (POST-ANTICIPATION, POST-COPING) and GROUP (STRESS + VIDEO, STRESS + BFB, CTRL + BFB) as fixed effects with interaction terms.

**Autonomic nervous system.** The effects of GROUP on physiological dependent variables (cumulative cardiac coherence, SDRR, RMSSD) were investigated with one-way ANOVAs or Kruskal–Wallis tests.

**Post-intervention self-reported measures.** The *a posteriori* effects of GROUP on psychological dependent variables (VAS-diminution, VAS-performance, VAS-use) were investigated with one-way ANOVAs.

**Cognitive tasks.** We investigated the effect of GROUP on quantitative cognitive dependent variables with one-way ANOVAs or Kruskal–Wallis tests.

For all variables, skewness and kurtosis were determined (Table 3), and, if the values were too high, non-parametric tests were performed. The intended sample size was calculated using G\*Power (version 3.1.9) for repeated measures, with a between-factors ANOVA design. An *a priori* power calculation ( $\alpha = 5\%$ ,  $1 - \beta = 0.85$ ) based on a medium effect size resulted in a total sample size of 39 participants (minimum of 13 participants per group). Although the literature revealed the strong effect of BFB on stress and anxiety (Hedges'  $g = 0.83$ ), these effects came from BFB training and not acute intervention as here, where a medium effect might be expected (Goessl et al., 2017). Statistical analyses were performed using the R freeware (3.6.1). The statistical significance threshold was set up for a type 1 error rate of  $\alpha = 5\%$ . The assumption of stress markers' direction was strong, and therefore GROUP effects on stress markers were explored unilaterally. The flow diagram is presented in Appendix 3.

## 3. Results

### 3.1. Group homogeneity

All groups were equivalent in terms of demographic characteristics and exhibited similar anxiety traits, fear of negative evaluation, and depressive symptoms. Overall, participants presented moderate anxiety traits ( $42.23 \pm 10.04$ ) and fear of negative evaluation ( $13.36 \pm 5.74$ ), as well as mild depression ( $2.77 \pm 2.50$ ). At the beginning of the

**Table 1**  
Values expressed are means  $\pm$  SD for each group.

	STRESS + VIDEO	STRESS + BFB	CTRL + BFB	P value
<b>Demographic parameters</b>				
Age (years old)	25.78 $\pm$ 4.34	23.33 $\pm$ 2.47	26.55 $\pm$ 3.58	0.02
Female n (%)	5 (36%)	8 (53%)	9 (60%)	0.41
Body mass index (kg.m <sup>-2</sup> )	21.57 $\pm$ 2.58	22.45 $\pm$ 2.65	21.86 $\pm$ 1.79	0.60
Education (years post bachelor)	5.71 $\pm$ 2.46	4.47 $\pm$ 1.25	5.93 $\pm$ 1.90	0.07
<b>Psychometrics</b>				
Anxiety trait STAIT	42.14 $\pm$ 9.98	44.21 $\pm$ 10.22	40.47 $\pm$ 10.29	0.61
Fear of negative evaluation FNE	14.14 $\pm$ 5.63	13.4 $\pm$ 4.60	12.60 $\pm$ 7.03	0.78
Depression BDI-13	2.86 $\pm$ 2.21	3.13 $\pm$ 3.09	2.33 $\pm$ 2.16	0.84
VAS-stress basal	1.86 $\pm$ 1.93	1.85 $\pm$ 1.87	1.28 $\pm$ 1.42	0.52

experiment, all groups were equivalent in terms of subjective stress level (VAS-stress basal) (Table 1).

3.2. Analysis of dependent variables controlling stress anticipation and coping interventions

3.2.1. Instantaneous psychometric measures

The linear mixed analysis revealed a main effect of GROUP on subjective stress assessment ( $\chi^2[2] = 10.61, p < 0.01, R_p^2 = 0.14$ ) (Fig. 3A).

Overall, VAS-stress scores were significantly lower in the CTRL + BFB than in the STRESS + VIDEO (fitted estimate:  $1.55 \pm 0.60$ ) and STRESS + BFB ( $1.76 \pm 0.59$ ) groups, indicating that the anticipatory stress induction was effective. The model revealed a main effect of TIME on VAS-stress ( $\chi^2[1] = 30.08, p < 0.001, R_p^2 = 0.18$ ), with a decrease in stress perception during the coping period ( $-1.70 \pm 0.31, p < 0.001$ ). No significant GROUP  $\times$  TIME interaction was detected ( $\chi^2[2] = 2.47, p = 0.15$ ).

The linear mixed analysis revealed a main GROUP effect on the cognitive appraisal ratio ( $\chi^2[2] = 7.87, p < 0.01, R_p^2 = 0.14$ ) (Fig. 3B).

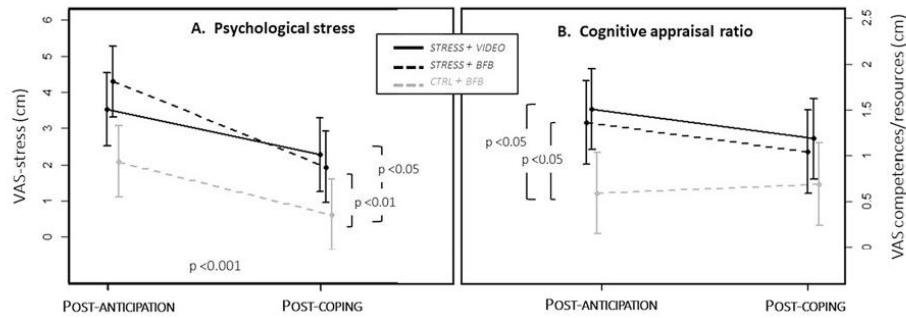


Fig. 3. Evolution of instantaneous psychological markers.

Note. Plot of the GROUP  $\times$  TIME interaction with 95% confidence intervals. A: Subjective stress marker indexed from VAS-stress scores. B: Cognitive appraisal ratio indexed from competence/resources VAS scores (ratio of 1 means resources were equal to the required competences). Full dark lines correspond to the STRESS + VIDEO group, dashed dark and grey lines respectively correspond to the STRESS + BFB and CTRL + BFB groups.

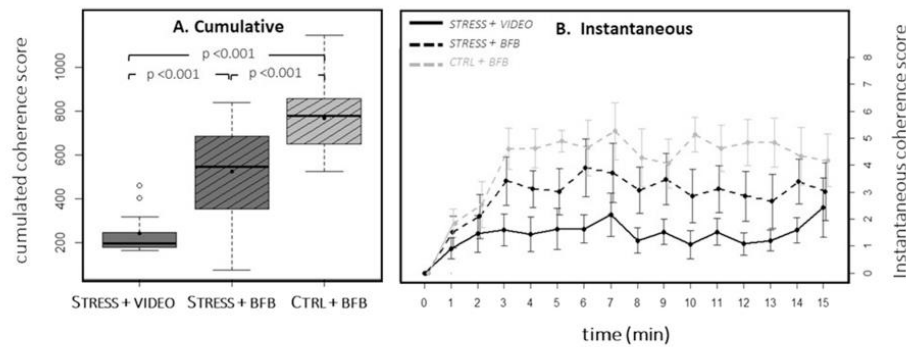


Fig. 4. Scores of cardiac coherence

Note. A: Cardiac coherence scores at the end of the stress coping method. B: Evolution of instantaneous cardiac coherence scores during the stress coping period. Full dark line corresponds to the STRESS + VIDEO group, dashed dark line to the STRESS + BFB group, and light dashed line to the CTRL + BFB group. Points represent the means presented with their standards deviations. The figure shows that viewing a video (STRESS + VIDEO) led to a slight increase of coherence during the first 2 min. Biofeedback practice (STRESS + BFB and CTRL + BFB) led to an increase of coherence during the first 3 min. Ceiling effects were assessed by calculating the mean of cardiac coherence for each group from the fourth minute of intervention until the end.

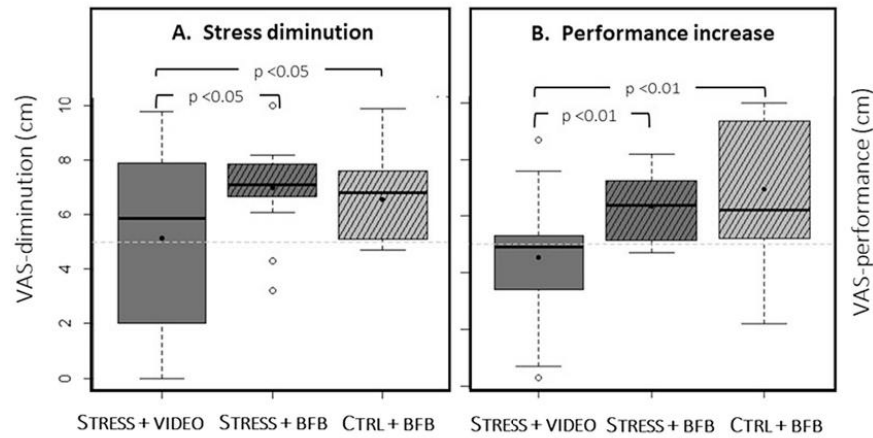


Fig. 5. Post-intervention self-reported measures.

Note. Subjective stress marker derived from stress Visual Analogous Scale scores. A: Stress diminution. B: Subjective performance. A score equal to 5 (dashed grey light line) represents a null effect. Participants judged that BFB intervention helped them decreasing their global stress and improving their performance.

The ratio was significantly smaller in the CTRL + BFB than in the STRESS + VIDEO ( $0.56 \pm 0.27, p < 0.05$ ) and STRESS + BFB (fitted estimate:  $0.71 \pm 0.27, p < 0.05$ ) groups. Finally, the model revealed no significant main TIME effect ( $\chi^2[1] = 1.79, p = 0.09$ ). No GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[2] = 2.14, p = 0.17$ ) was observed.

The linear mixed analysis of AD-ACL scores revealed a main GROUP effect on internal relaxation ( $\chi^2[2] = 6.02, p < 0.05, R_p^2 = 0.09$ ). Internal relaxation was significantly higher in the CTRL + BFB than in the STRESS + BFB group (fitted estimate:  $1.80 \pm 0.81, p < 0.05$ ). A main TIME effect on internal relaxation ( $\chi^2[1] = 26.34, p < 0.001, R_p^2 = 0.17$ ) was detected: overall relaxation increased during the coping period ( $2.18 \pm 0.43, p < 0.001$ ). No GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[2] = 2.83, p = 0.12$ ) was observed.

No main GROUP effect was found for internal tension ( $\chi^2[2] = 3.51, p = 0.08$ ). A main effect on TIME ( $\chi^2[1] = 9.79, p < 0.001, R_p^2 = 0.13$ ) showed a decrease of internal tension ( $-1.27 \pm 0.41, p < 0.001$ ) during the coping period. Importantly, a GROUP  $\times$  TIME interaction was found ( $\chi^2[2] = 7.70, p < 0.05, R_p^2 = 0.06$ ), the decrease in internal tension being significantly greater in the STRESS + BFB than in the CTRL + BFB group ( $2.60 \pm 0.99, p < 0.05$ ).

Our results attested that the TSAS protocol induced a significant anticipatory stress and that the coping intervention did not influence instantaneous perception.

### 3.2.2. Autonomic nervous system measures

The ANOVA on cardiac coherence scores revealed a main GROUP effect ( $F_{2,33} = 28.34, p < 0.001, \eta^2 = 0.63$ ) (Fig. 4A). Cumulative cardiac coherence was higher in the STRESS + BFB than in the STRESS + VIDEO group ( $p < 0.001$ ) and higher in the CTRL + BFB than in the STRESS + VIDEO group ( $p < 0.001$ ). Interestingly, participants from the CTRL + BFB group obtained higher coherence scores than those from the STRESS + BFB group ( $p < 0.001$ ), demonstrating that anticipatory stress induction had a negative long-lasting effect on cardiac coherence.

The evolution of instantaneous coherence further showed highly interesting patterns (Fig. 4B), and different ceiling effects were detected;

Table 2

Performance in each cognitive task. Values expressed are means  $\pm$  SD for each group.

	STRESS + VIDEO	STRESS + BFB	CTRL + BFB	F value	P value
WCST					
Performance	0.31 $\pm$ 0.13	0.29 $\pm$ 0.13	0.30 $\pm$ 0.15	0.09	0.92
STROOP					
Performance	5.07 $\pm$ 1.82	5.07 $\pm$ 1.79	4.07 $\pm$ 2.96	0.97	0.39
VERBAL FLUENCY					
Fluency score	68.5 $\pm$ 12.41	71.33 $\pm$ 15.74	75.20 $\pm$ 13.43	0.84	0.43
WM score	0.98 $\pm$ 0.02	0.98 $\pm$ 0.02	0.99 $\pm$ 0.02	0.13	0.94
TRAIL LETTER					
Performance	0.48 $\pm$ 0.17	0.44 $\pm$ 0.20	0.50 $\pm$ 0.11	0.53	0.59

WCST (proportion of errors), STROOP (proportion of solved stimuli), Fluency (number of words), WM (proportion of new words), Trail (proportion of time difference).

the highest ceiling was found for the CTRL + BFB group (4.63), followed by the STRESS + BFB (3.12) and the STRESS + VIDEO (1.44) groups. When BFB practice was preceded by the TSAAS protocol, the ceiling effect was lowered by 33%, indicating that anticipatory stress impaired the coherence achievable via BFB practice.

The model of SDRR scores revealed no main GROUP effect ( $\chi^2 = 0.61, p = 0.37$ ) ( $109.00 \pm 39.64$  ms, STRESS + VIDEO;  $125.17 \pm 101.75$  ms, STRESS + BFB;  $139.72 \pm 65.41$  ms, CTRL + BFB). The model of RMSSD scores revealed no main GROUP effect ( $\chi^2 = 1.21, p = 0.27$ ) ( $57.62 \pm 24.66$ , STRESS + VIDEO;  $47.63 \pm 21.40$ , STRESS + BFB;  $66.24 \pm 34.47$ , CTRL + BFB).

Importantly, participants in the BFB conditions estimated that 11 ( $\pm 5$ ) min of BFB intervention was ideally needed to feel well-prepared for an upcoming stressful event ( $12.03 \pm 6.25$ , STRESS + BFB;  $9.47 \pm 3.04$ , CTRL + BFB). The estimated duration did not differ between the two groups,

**Table 3**

Skewness and kurtosis values of all variables. For the CAR, as residuals plots revealed a poor assumptions diagnostic, additional Kruskal tests assessing TIME and GROUP effects in separate models were performed. As for the lme model, a GROUP effect ( $\chi^2(2)=22.28$ ,  $p < 0.01$ ) and no TIME effect were found ( $\chi^2(1)=1.62$ ,  $p=0.20$ ).

	Value	Skewness	Kurtosis	Normality of model residuals
Group's homogeneity	Age	0.82	3.95	$p = 0.03$
	BMI	0.30	2.85	$p = 0.93$
	Post-bac	0.80	3.78	$p < 0.01$
	STAI-Y-B	0.13	2.35	$p = 0.65$
	FNE	0.19	2.68	$p = 0.86$
	BDI-13	0.68	2.69	$p = 0.02$
	VAS stress basal	1.17	3.50	$p < 0.01$
	VAS-stress	0.82	2.97	
Instantaneous	CAR <sup>a</sup>	2.39	10.07	
	AD-ACL relaxation	-0.28	2.59	
	AD-ACL tension	0.83	2.69	
Autonomic nervous system	Cardiac coherence	0.28	2.03	$p = 0.83$
	SDRR	2.65	11.53	$p < 0.01$
	RMSSD	1.04	2.87	$p < 0.01$
	VAS-diminution	-0.78	3.15	$p = 0.74$
Post-intervention self-reported measures	VAS-performance	-0.26	3.20	$p = 0.52$
	VAS-use	-0.85	3.06	$p = 0.07$
	WCST	-0.18	2.48	$p = 0.40$
Cognitive tasks	STROOP	-0.12	2.57	$p = 0.39$
	FLUENCY	0.05	2.55	$p = 0.44$
	WM	-1.63	5.79	$p < 0.01$
	TLMT	-0.18	2.90	$p = 0.98$

indicating that the anticipatory stress did not affect the estimated time needed ( $F_{2,28} = 2.04$ ,  $p = 0.16$ ).

### 3.2.3. Post-intervention self-reported measures

The ANOVA on VAS-diminution scores revealed a main GROUP effect ( $F_{2,41} = 2.68$ ,  $p < 0.05$ ,  $\eta^2 = 0.12$ ) (Fig. 5A). The heart-rate variability BFB was an effective intervention for reducing anticipatory stress, as decreasing scores were greater in the STRESS + BFB than in the STRESS + VIDEO group (1.86 [0.17; 3.11],  $p < 0.05$ ) and higher in the CTRL + BFB than in the STRESS + VIDEO group (1.42 [-0.27; 3.49],  $p < 0.05$ ).

The ANOVA on VAS-performance also revealed a main GROUP effect ( $F_{2,41} = 5.77$ ,  $p < 0.01$ ,  $\eta^2 = 0.22$ ). Judgement of how the treatment influenced performance was higher for the BFB than for the VIDEO intervention group (Fig. 5B). Specifically, scores were higher in the STRESS + BFB than in the STRESS + VIDEO group (fitted estimate: 1.81 [0.32; 3.31],  $p < 0.01$ ) and higher in the CTRL + BFB compared with the STRESS + VIDEO group (2.43 [0.94; 3.93],  $p < 0.01$ ). The VAS-performance was similar in the STRESS + BFB and CTRL + BFB groups (0.61 [-0.86; 2.80],  $p = 0.20$ ).

Furthermore, the ANOVA on stress VAS-use revealed a main GROUP effect ( $F_{2,41} = 6.90$ ,  $p < 0.01$ ,  $\eta^2 = 0.25$ ). Self-rated scores reflecting the further personal or professional use of the stress-coping intervention were higher in the STRESS + BFB than in the STRESS + VIDEO group (2.39 [0.75; 4.03],  $p < 0.01$ ) and in the CTRL + BFB compared with the STRESS + VIDEO group (2.80 [1.17; 4.44],  $p < 0.01$ ).

### 3.3. Analysis of executive cognitive functions

There was no main GROUP effect for all quantitative cognitive dependent variables (Table 2).

## 4. Discussion

The present study aimed to characterize the stress anticipation period using the TSAS induction and to evaluate the effectiveness of a 15-min session of heart-rate variability BFB as a proactive coping

method. As expected, the TSAS induction affected psychological and physiological stress responses during the anticipation period. Our results further showed that 15 min of BFB intervention alleviated the physiological stress markers. Although no effects of BFB were found on objective cognitive performance, post-intervention subjective assessments yielded beneficial effects of BFB on the perception of stress reduction and performance.

We used the TSAS protocol based on the anticipation period of the TSST (Kirschbaum et al., 1993), with the aim of strengthening the psychological stressor by adding hierarchical social evaluation and leaving the participant alone at the end of the induction (Appendix 2). In contrast to previous protocols, such as the anticipation of a parachute jump or the threat of shocks (Cain et al., 2011; Taverniers et al., 2011), the TSAS protocol is more ecological and elicits an easy reproducible psychological stress, which is not resource intensive (in terms of time, human resources, or materials). The TSAS protocol was found to affect psychological stress immediately, and lasting effects were still detectable after 15 min. Compared with the control condition, stressed participants had higher stress levels and cognitive appraisal ratios, indicating that they judged the situation as more threatening. Notably, the TSAS protocol was found to have physiological and psychological correlates. Lower cardiac coherence was found in the STRESS + BFB than in the CTRL + BFB group. This result replicates the fundamental relationship between cardiac coherence and emotions, stipulating that negative emotions such as sadness and stress are associated with lower cardiac coherence (McCraty et al., 2009). Our study provides evidence, that the coherence achievable through the BFB intervention was affected by anticipatory stress. Previous studies further demonstrated the effects of anticipatory stress on autonomic regulation (Gonzalez-Bono et al., 2002; Nasso et al., 2019), mainly with short anticipation periods (2.5–5 min). Examining a longer anticipatory period seems more relevant, matching anticipatory stress faced in ecological contexts. Future studies assessing electrodermal activity and hormonal secretions are required to explore long-lasting effects of the TSAS protocol on the autonomic nervous system and the hypothalamus–pituitary axis.



Our data demonstrated that the TSAS protocol provides an optimal means of testing the effectiveness of coping interventions in an overall stress response. Heart-rate variability BFB interventions have primarily been used following stressful events (De Witte et al., 2019; Plans et al., 2019). The present data provided clear evidence that 15 min of BFB intervention is an efficient proactive stress-coping method. Applying BFB immediately after the TSAS protocol enabled an increase in cardiac coherence. Although psychological effects were not detected immediately, *a posteriori* judgements revealed that BFB intervention helped to decrease perceived stress and improve subjective perception of performance. These findings are in line with the literature reporting the positive impact of proactive BFB interventions on various psychological and physiological stress markers (Meyer et al., 2018; Prinsloo et al., 2013; Sherlin et al., 2009; Whited et al., 2014). To date, durations of BFB interventions have been inconsistently designed (Meyer et al., 2018; Prinsloo et al., 2011, 2013; Schäfer et al., 2018; Sherlin et al., 2009). The evolution of the cardiac coherence score may be an ingenious way to investigate the optimal intervention's duration, notably for acute interventions. To our knowledge, the present findings report for the first time the evolution of cardiac coherence during a 15-min period. Participants of both BFB groups reported difficulties in maintaining focused attention during the whole intervention because of fatigue and lassitude. They further reported that 11 min of BFB might be the ideal duration for proactively coping with upcoming stressful situations. This duration might be used as an indicator for further methodological designs. However, future research with a larger sample size remains necessary to investigate in greater details the congruence between psychological and physiological markers. Spurred by these findings, future studies should now test the long-lasting temporal effects of a proactive intervention on following acute stress management and recovery.

Finally, data did not reveal any effect of the intervention on cognitive performance. To our knowledge, only few studies assessed core executive functions in a laboratory using public speech anticipation (Starcke et al., 2008). As in the present experiment, Starcke et al. (2008) performed a similar set of cognitive tasks, including the Wisconsin, Stroop, and Trail making tests, and found no effect on performance. Similarities in the pattern of results should be interpreted with caution, as in the present study, participants performed additional coping strategies that may have affected cognitive performances. Indeed, Prinsloo et al. (2011) previously reported improved reaction times and accuracy in the Stroop task after the completion of a 10-min BFB intervention. Similarly, a recent study assessed the effect of 5 min of BFB intervention during an ecological stressing event and showed gains in performance skills associated with executive functions (Schlatter, Therond, et al., 2020). In the present work, although not confirmed by the quantitative analysis, participants from both BFB groups felt that the intervention positively influenced their cognitive performance. As basal cognitive abilities were not assessed, such incongruence between subjective and objective data might result from initial group differences in cognitive abilities. The possible effect of anticipatory stress and BFB on executive functions therefore requires further experimental investigation through a test-retest design without confounding learning effects.

This study acknowledges some limitations. As our sample size was quite small and homogeneous, we advise further replications in a more heterogeneous sample (e.g., age groups, mixed cultural background, anxious or depressive populations). Moreover, future studies should replicate these findings in various samples of participants to allow the generalization of the use of the TSAS protocol to elicit a stress anticipation response. Correlations between cardiac coherence and psychometric parameters are required before drawing conclusions regarding

the timing of acute BFB intervention effectiveness. Furthermore, we did not assess participants' initial experience with stress coping methods (e.g., meditation, relaxing breathing). Some participants may have been more familiar with these techniques, although none declared any previous experience with BFB. Another limitation is the lack of an additional CTRL + VIDEO group, which would have contributed to selectively examine the isolated effects of BFB and video without anticipatory stress. As the primary goal of our study was to characterize the anticipation stress period, such a group was not explored. Similarly, as no group performed the relaxing breathing separately, our methodology does not allow the disentangling of breathing from BFB effects. While this remains a working hypothesis, we postulate that BFB enhanced the positive effects of relaxing breathing. Accordingly, a recent review reported that combining BFB with other stress management interventions improved in a greater way both physiological and psychological indicators of stress (DeWitte et al., 2019). Although an additional effect of the BFB compared with relaxing breathing alone remains unclear for long interventions (30 min), beneficial effects have been highlighted for shorter interventions (Schlatter, Therond, et al., 2020). We therefore believe that BFB paired with objective achievement helped participants to stay focused, thereby facing a more challenging task and facilitating the awareness and control of physiological adjustments (Subhani et al., 2018).

## 5. Conclusions and clinical applications

In conclusion, stress is an important societal problem, and stressful situations are frequent in our modern way of life, with repetitive global stress responses increasing the risk of psychological (e.g., burn-out, depression) and physiological diseases (hypertension). Therefore, the development of cost-effective and non-invasive methods applicable before the occurrence of a stressful event are necessary. Our study highlighted the importance of the stress anticipation period, which allowed the establishment of proactive stress-coping methods. We demonstrated that 15 min of BFB was an effective intervention for reducing an anticipatory stress response. This technique offered rapid physiological and psychological effects without being resource intensive and benefited from high adherence. Various cost-effective BFB mobile applications have been developed, and some of these have been scientifically validated (for a critical review, see Jonathan et al., 2018). This accessibility and growing familiarity with health gadgets provide a promising outlook for individual real-life implementation.

Regular BFB training has been established as a relevant cost-effective technique among healthy and clinical population for improving self-reported stress and anxiety. Our findings suggest that this technique may be of further use in specific situations to prevent the occurrence of a major stress response and therefore prevent numerous stress-associated deleterious side effects. In only 15 min of practice, BFB users learnt a way to have conscious and partial control of their body's responses; therefore, an acute BFB session may be a tool to help patients in discriminating their feelings according to their physiology. Before BFB may be implemented as a proactive strategy in clinical settings, the positive effects during an anticipatory stress period must be confirmed with patients presenting with stress-related disorders (e.g., post-traumatic stress syndrome, generalized anxiety disorders, burnout, depression). Certainly, once patients have learned the technique and identified stressful situations beforehand, they should be led towards its autonomous use for coping in the light of upcoming stressors in their life.

## Funding

The authors received no funding from an external source. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## CRedit authorship contribution statement

**Sophie Schlatter:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Supervision, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Laura Schmidt:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Marc Lilot:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Validation, Writing – review & editing. **Aymeric Guillot:** Conceptualization, Data curation, Methodology, Project administration,

Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing. **Ursula Debnort:** Conceptualization, Data curation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing.

## Declaration of competing interest

We have no known conflict of interest to disclose.

## Acknowledgments

The authors thank the subjects who volunteered to participate in this study. The authors warmly thank the two anonymous reviewers for their constructive help for manuscript improvement.

## Appendices.

### Appendix 1

#### Visual Analogues Scales VAS

##### Each scale measures 10 cm with two adjectives in the extremities of the axis [left: right]

VAS-stress	[zero: maximum]	What is your stress level at that moment?
VAS-competences	[zero: maximum]	How do you estimate the level of skills needed to properly manage the upcoming situation?
VAS-resources	[zero: maximum]	How do you estimate your level of resources to deal with the upcoming situation?
VAS-diminution	[absolutely not: completely]	Did the biofeedback/video intervention help you to reduce your stress level?
VAS-performance	[negative: positive]	Did the biofeedback/video intervention influence your personal performance?
VAS-use	[absolutely not: completely]	Do you think that the biofeedback could be used in your professional/personal practice?

- In your opinion, what would be the ideal duration of the biofeedback when you prepare for a stressful event? (Open answer).

### Appendix 2

#### **The Trier Social Anticipatory Stress (TSAS) induction procedure**

The participant is seated, and the experimenter is standing, equipped with a notepad. Regardless of any interaction, he/she will ensure a serious tone while giving following instructions.

“You will remain seated, and for 15 min you are going to [watch a video/carry out a breathing exercise]. Then you will fill out some short questionnaires. Thereafter, I will leave the room and you will take a test, which will be evaluated by a judging panel. This panel consists of my superiors [XY, full professor of the university, and XY, doctor in the field of ...]; both are lecturers at the [University of Lyon 1].”

The experimenter presents the panel in an impressed/intimidated manner to stress their authority.

“The test is composed of two different consecutive evaluations.

In the first part, you are going to face a job interview, for which you choose the profession that you really wish to work in. You will need to give an application talk and convince the panel of your motivation and competences. You should emphasize your strengths and weaknesses.

For the next 5 min, you will perform a task testing your mental calculation skills. Your mistakes will be raised by the judging panel, and after each mistake you will have to restart from the beginning.

Your performance in convincing the judging panel of your abilities and calculation skills will also be recorded by a video camera. The video will further be analysed by behavioural specialists, who will specifically analyse gestures and non-verbal behaviour, as well as vocal frequency and fluency.”

The experimenter points to the visible interview set-up in the same room.

“I will now inform the panel in advance for them to get prepared to attend to you.”

If questions are asked: “The judging panel will respond to your question. I am not in the position to tell you additional information.”

At the end, the experimenter leaves the room for one or 2 min to apparently inform the panel, in order to a) create a realistic impression of the subsequent virtual event, which is especially important if no real stressful event actually follows, and b) give the participant time alone to digest the received information and build up anticipatory stress.

### Appendix 3

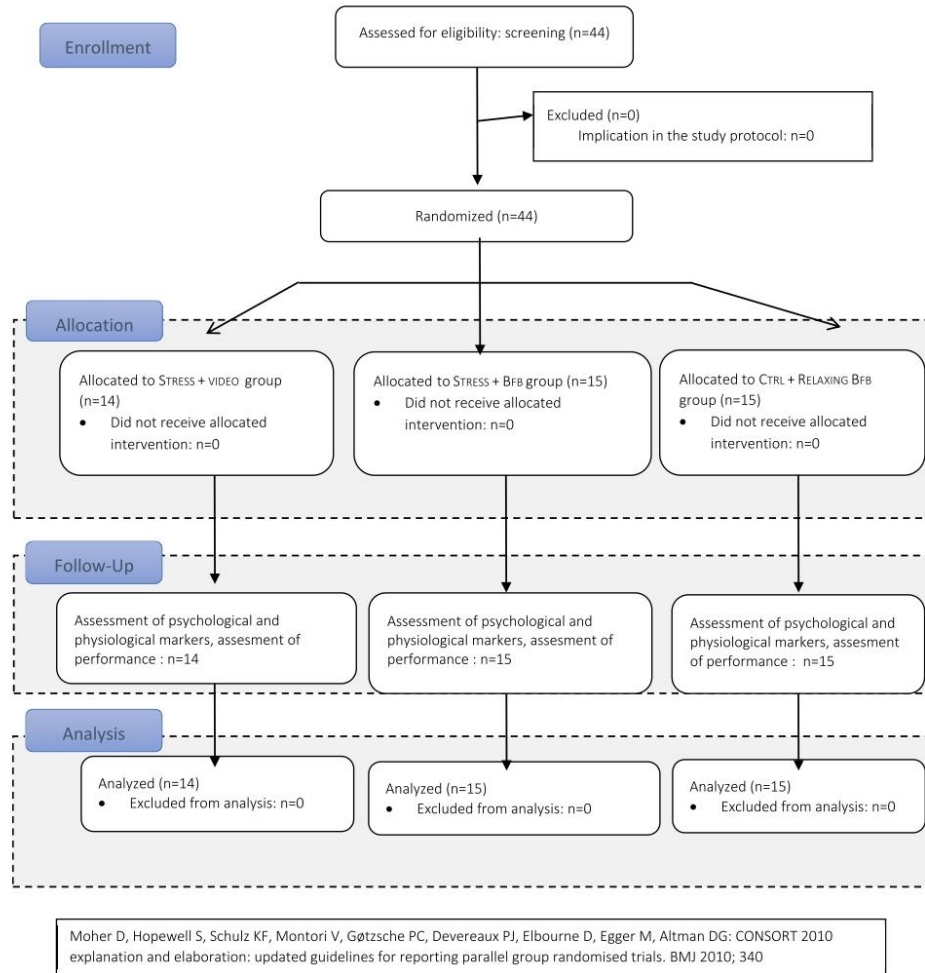
**Consolidated Standards of Reporting Trials 2010****Flow Diagram**

Fig. 6. Consolidated standards of reporting trials 2010: flow diagram.

**References**

- Alexander, J. K., Hillier, A., Smith, R. M., Tivarus, M. E., & Beversdorf, D. Q. (2007). Beta-adrenergic modulation of cognitive flexibility during stress. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(3), 468–478. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.3.468>.
- Beck, A., & Beck, R. (1972). Screening depressed patients in family practice. A rapid technic. *Postgraduate Medicine*, 52(6), 81–85. <https://doi.org/10.1080/00325481.1972.11713319>.
- Berry, M. E., Chapple, I. T., Ginsberg, J. P., Gleichauf, K. J., Meyer, J. A., & Nagpal, M. L. (2014). Non-pharmacological intervention for chronic pain in veterans: A pilot study of heart rate variability biofeedback. *Global Advances in Health and Medicine*, 3(2), 28–33. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2013.075>.
- Brosschot, J. F., Gerin, W., & Thayer, J. F. (2006). The perseverative cognition hypothesis: A review of worry, prolonged stress-related physiological activation, and health. *Journal of Psychosomatic Research*, 60(2), 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2005.06.074>.
- Bruchon-Schweitzer, M., & Paulhan, I. (1993). Inventaire d'Anxiété trait-état. In C. D. Spielberger (Ed.), *Forme Y. STAI-Y*. Centre de.
- Cain, M. S., Dunsmoor, J. E., LaBar, K. S., & Mitroff, S. R. (2011). Anticipatory anxiety hinders detection of a second target in dual-target search. *Psychological Science*, 22(7), 866–871. <https://doi.org/10.1177/0956797611412393>.
- Carnevali, L., Pattini, E., Sgoifo, A., & Ottaviani, C. (2019). Effects of prefrontal transcranial direct current stimulation on autonomic and neuroendocrine responses to psychosocial stress in healthy humans. *Stress: The International Journal on the Biology of Stress*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/10253890.2019.1625884>, 0(0).

- Childre, D., & Martin, H. (1999). *The HeartMath solution*. Harper.
- Cohen, S., Kessler, R. C., & Gordon, L. U. (1997). Strategies for measuring stress in studies of psychiatric and physical disorders. In *Measuring stress: A guide for health and social scientists* (pp. 3–26). Oxford University Press.
- Collet, L., & Cottiaux, J. (1986). The shortened Beck depression inventory (13 items). Study of the concurrent validity with the Hamilton scale and Widlöcher's retardation scale. *L'Encéphale*, 12(2), 77–79. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3743520>.
- Collet, C., Petit, C., Priez, A., & Dittmar, A. (2005). Stroop color-word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation. *Biological Psychology*, 69(2), 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.07.003>.
- Contrada, R. J., & Baum, A. (Eds.). (2010). *The handbook of stress Science : Biology, psychology, and health*. Springer P.
- Cristofori, L., Cohen-Zimmerman, S., & Grafman, J. (2019). Executive functions. In *Handbook of clinical neurology* (Vol. 163, pp. 197–219). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2>.
- DeWitte, N. A. J., Buyck, I., & Van Daele, T. (2019). Combining biofeedback with stress management interventions: A systematic review of physiological and psychological effects. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-09427-7>.
- Dickerson, S. S., & Kemeny, M. E. (2004). Acute stressors and cortisol responses: A theoretical integration and synthesis of laboratory research. *Psychological Bulletin*, 130(3), 355–391. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.3.355>.
- Dickerson, S. S., Mycek, P. J., & Zaldivar, F. (2008). Negative social evaluation, but not mere social presence, elicits cortisol responses to a laboratory stressor task. *Health Psychology*, 27(1), 116–121. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.27.1.116>.
- Dillon, A., Kelly, M., Robertson, I. M., & Robertson, D. A. (2016). Smartphone applications utilizing biofeedback can aid stress reduction. *Frontiers in Psychology*, 7(832). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>.
- Duan, H., Wang, X., Hu, W., & Koumjos, J. (2019). Effects of acute stress on divergent and convergent problem-solving. *Thinking & Reasoning*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/13546783.2019.1572539>, 0(0).
- Gaab, J., Rohleder, N., Nater, U. M., & Ehlert, U. (2005). Psychological determinants of the cortisol stress response: The role of anticipatory cognitive appraisal. *Psychoneuroendocrinology*, 30(6), 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2005.02.001>.
- Gevirtz, R. (2013). The promise of heart rate variability biofeedback: Evidence-based applications. *Biofeedback*, 41(3), 110–120. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.01>.
- Goessl, V. C., Curtiss, J. E., & Hofmann, S. G. (2017). The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety: A meta-analysis. *Psychological Medicine*, 47(15), 2578–2586. <https://doi.org/10.1017/S0033291717001003>.
- Gonzalez-Bono, E., Moya-Albiol, L., Salvador, A., Carrillo, E., Ricarte, J., & Gomez-Amor, J. (2002). Anticipatory autonomic response to a public speaking task in women: The role of trait anxiety. *Biological Psychology*, 60(1), 37–49. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(02\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(02)00008-X).
- Guez, J., Saar-Ashkenazy, R., Keha, E., & Tiferet-Dweck, C. (2016). The effect of Trier Social Stress Test (TSST) on item and associative recognition of words and pictures in healthy participants. *Frontiers in Psychology*, 7(APR). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00507>.
- Hyun, J., Sliwinski, M. J., & Smyth, J. M. (2018). Waking up on the wrong side of the bed: The effects of stress anticipation on working memory in daily life. *Journal of Gerontology: Series Bibliographic*, 1–9. <https://doi.org/10.1093/geronb/gby042>, 00(00).
- Ioannou, C. I., Furuya, S., & Altman, E. (2016). The impact of stress on motor performance in skilled musicians suffering from focal dystonia: Physiological and psychological characteristics. *Neuropsychologia*, 85, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.03.029>.
- Jonathan, P., Kerr, G., & Sullivan, J. P. (2018). A critical review of consumer wearables, mobile applications and equipment for providing biofeedback, monitoring stress and sleep in physically active populations. Tissue Repair and Translational Physiology Research Program, School of Biomedical Science. *Frontiers in Physiology*. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00743> (in press).
- Kirschbaum, C., Pirke, K. M., & Hellhammer, D. H. (1993). The Trier Social Stress Test – a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28, 76–81. <https://doi.org/10.1159/00019004>.
- Kortte, K. B., Horner, M. D., & Windham, W. K. (2002). The trail making test, Part B: Cognitive flexibility or ability to maintain set? *Applied Neuropsychology*, 9(2), 106–109. [https://doi.org/10.1207/S15324826AN0902\\_5](https://doi.org/10.1207/S15324826AN0902_5).
- Kudielka, B. M., Schommer, N. C., Hellhammer, D. H., & Kirschbaum, C. (2004). Acute HPA axis responses, heart rate, and mood changes to psychosocial stress (TSST) in humans at different times of day. *Psychoneuroendocrinology*, 29, 983–992. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2003.08.009>.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer P.
- Leahy, J. M. (1992). Validity and reliability of the Beck depression inventory-short form in a group of adult bereaved females. *Journal of Clinical Psychology*, 48(1), 64–68. [https://doi.org/10.1002/1097-4679\(199201\)48:1<64::AID-JCLP2270480109>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1097-4679(199201)48:1<64::AID-JCLP2270480109>3.0.CO;2-9).
- Leher, P. M., Vaschillo, E., & Vaschillo, B. (2000). Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability: Rationale and manual for training. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 25(December), 177–191. <https://doi.org/10.1023/A>.
- McCraty, R., Atkinson, M., Tomasino, D., & Bradley, R. (2009). The coherent heart-brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order. *Integral Review: A Transdisciplinary & Transcultural Journal for Next Thought, Research, & Praxis*, 5(2).
- McCraty, R., & Zayas, M. A. (2014). Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability and psychosocial well-being. *Frontiers in Psychology*, 5(SEP), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01090>.
- Meyer, P., Friederich, H., & Zastrow, A. (2018). Breathe to ease - respiratory biofeedback to improve heart rate variability and coping with stress in obese patients: A pilot study. *Mental Health & Prevention*, 11(June), 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.mhp.2018.06.001>.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>.
- Musa, C., Kostogianni, N., & Lépine, J.-P. (2004). Échelle de peur de l'évaluation négative (FNE) : Propriétés psychométriques de la traduction française. *L'Encéphale*, 30(6), 517–524. [https://doi.org/10.1016/s0013-7006\(04\)95465-6](https://doi.org/10.1016/s0013-7006(04)95465-6).
- Nasso, S., Vanderhasselt, M. A., Demeyer, I., & Raedt, R. De (2019). Autonomic regulation in response to stress: The influence of anticipatory emotion regulation strategies and trait rumination. *Emotion*, 19(3), 443–454. <https://doi.org/10.1037/emo0000448>.
- Neupert, S. D., Ennis, G. E., Ramsey, J. L., & Gall, A. A. (2016). Solving tomorrow's problems today? Daily anticipatory coping and reactivity to daily stressors. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 71(4), 650–660. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbv003>.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2011). *Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3*.
- Plans, D., Morelli, D., Sütterlin, S., Ollis, L., Derbyshire, G., & Cropley, M. (2019). Use of a biofeedback breathing app to augment poststress physiological recovery: Randomized pilot study. *Journal of Medical Internet Research*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.2196/12227>.
- Plessow, F., Schade, S., Kirschbaum, C., & Fischer, R. (2012). Better not to deal with two tasks at the same time when stressed: Acute psychosocial stress reduces task shielding in dual-task performance. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(3), 557–570. <https://doi.org/10.3758/s13415-012-0098-6>.
- Preston, S. D., Buchanan, T. W., Stansfield, R. B., & Bechara, A. (2007). Effects of anticipatory stress on decision making in a gambling task. *Behavioral Neuroscience*, 121(2), 257–263. <https://doi.org/10.1037/0735-7044.121.2.257>.
- Prinsloo, G. E., Derman, W. E., Lambert, M. I., & Laurie-Rauch, H. G. (2013). The effect of a single session of short duration biofeedback-induced deep breathing on measures of heart rate variability during laboratory-induced cognitive stress: A pilot study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 38(2), 81–90. <https://doi.org/10.1007/s10484-013-9210-0>.
- Prinsloo, G. E., Rauch, H. G. L., Lambert, M. I., Muench, F., Noakes, T. D., & Derman, W. E. (2011). The effect of short duration heart rate variability (HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Applied Cognitive Psychology*, 25(5), 792–801. <https://doi.org/10.1002/acp.1750>.
- Pulopulos, M. M., Vanderhasselt, M. A., & De Raedt, R. (2018). Association between changes in heart rate variability during the anticipation of a stressful situation and the stress-induced cortisol response. *Psychoneuroendocrinology*, 94(May), 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2018.05.004>.
- Schäfer, S. K., Ihmig, F. R., Lara, K. A., Neurohr, F., Kiefer, S., Stagin, M., Lass-hennemann, J., & Michael, T. (2018). Effects of heart rate variability biofeedback during exposure to fear-provoking stimuli within spider-fearful individuals: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 19(184), 1–11.
- Schlatter, S., Guillot, A., Faes, C., Saruco, E., Collet, C., Di Rienzo, F., & Debatot, U. (2020a). Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study. *International Journal of Psychophysiology*, 152, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011>.
- Schlatter, S., Therond, C., Guillot, A., Rimmelé, T., Debatot, U., & Lilot, M. (2020b). Effects of standardized breathing and biofeedback on performance of anaesthesiologist residents during high fidelity simulation. *European Journal of Anaesthesiology*, 31(June), 410.
- Schoofs, D., Preuß, D., & Wolf, O. T. (2008). Psychosocial stress induces working memory impairments in an n-back paradigm. *Psychoneuroendocrinology*, 33(5), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.02.004>.
- Shaffer, F., McCraty, R., & Zerr, C. L. (2014). A healthy heart is not a metronome: An integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Frontiers in Psychology*, 5(9), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>.
- Sherlin, L., Gevirtz, R., Wyckoff, S., & Muench, F. (2009). Effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback versus passive biofeedback control. *International Journal of Stress Management*, 16(3), 233–248. <https://doi.org/10.1037/a0016047>.
- Shields, G. S., Sazma, M. A., McCullough, A. M., & Yonelinas, A. P. (2017). The effects of acute stress on episodic memory: A meta-analysis and integrative review. *Psychological Bulletin*, 143(6), 636–675. <https://doi.org/10.1037/bul0000100>.
- Speranza, M., Corcos, M., Loas, G., Stephan, P., Guibaud, O., Perez-Diaz, F., Venisse, J. L., Bizouard, P., Halfon, O., Flament, M., & Jeammet, P. (2005). Depressive personality dimensions and alexithymia in eating disorders. *Psychiatry Research*, 135(2), 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2005.04.001>.
- Spielberger, C., Gorsuch, R., Lushene, P., Vagg, P., & Jacobs, A. (1983). *Manual for the state trait anxiety inventory (form Y)*. Consulting Psychologists Press.
- Starcke, K., Wolf, O. T., Markowitsch, H. J., & Brand, M. (2008). Anticipatory stress influences decision making under explicit risk conditions. *Behavioral Neuroscience*, 122(6), 1352–1360. <https://doi.org/10.1037/a0013281>.
- Stoet, G. (2010). PsyToolkit: A software package for programming psychological experiments using linux. *Behavior Research Methods*, 42(4), 1096–1104. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.4.1096>.

- Stoet, G. (2017). PsyToolkit: A novel web-based method for running online questionnaires and reaction-time experiments. *Teaching of Psychology, 44*(1), 24–31. <https://doi.org/10.1177/0098628316677643>.
- Stroop, J. R. (1992). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General, 121*, 15–23.
- Subhani, A. R., Kamel, N., Saad, M. N. M., Nandagopal, N., Kang, K., & Malik, A. S. (2018). Mitigation of stress: New treatment alternatives. *Cognitive Neurodynamics, 12*(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11571-017-9460-2>.
- Taverniers, J., Smeets, T., Lo Bue, S., Syroit, J., Van Ruyseveldt, J., Pattyn, N., & Von Grumbkow, J. (2011). Visuo-spatial path learning, stress, and cortisol secretion following military cadets' first parachute jump: The effect of increasing task complexity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 11*(3), 332–343. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0043-0>.
- Taverniers, J., Van Ruyseveldt, J., Smeets, T., & Von Grumbkow, J. (2010). High-intensity stress elicits robust cortisol increases, and impairs working memory and visuo-spatial declarative memory in special forces candidates: A field experiment. *Stress: The International Journal on the Biology of Stress, 13*(4), 323–333. <https://doi.org/10.3109/10253891003642394>.
- Thayer, R. E. (1967). Measurement of activation through self-report. *Psychological Reports, 20*, 663–678.
- Thayer, R. E. (1978). Factor analytic and reliability studies on the activation-deactivation adjective check list. *Psychological Reports, 42*, 747–756.
- Thayer, R. E. (1989). *The biopsychology of mood and arousal*. Oxford University Press.
- VanDiest, I., Verstappen, K., Aubert, A. E., Widjaja, D., Vansteene, D., & Vlemingx, E. (2014). Inhalation/exhalation ratio modulates the effect of slow breathing on heart rate variability and relaxation. *Applied Psychophysiology and Biofeedback, 39*(3–4), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9253-x>.
- Vanier, M. (1991). *Test de Stroop*. Centre de recherche Institut de réadaptation de Montréal.
- Watson, D., & Friend, R. (1969). Measurement of social-evaluative anxiety. *Journal of Consulting and Clinical Psychology, 33*, 448–457.
- Wells, R., Outhred, T., Heathers, J. A. J., Quintana, D. S., & Kemp, A. H. (2012). Matter over mind: A randomised-controlled trial of single-session biofeedback training on performance anxiety and heart rate variability in musicians. *PLoS One, 7*(10), Article e46597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046597>.
- Whited, A., Larkin, K. T., & Whited, M. (2014). Effectiveness of emWave biofeedback in improving heart rate variability reactivity to and recovery from stress. *Applied Psychophysiology and Biofeedback, 39*(2), 75–88. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9243-z>.
- Woodcock, E. A., Greenwald, M. K., Khatib, D., Diwadkar, V. A., & Stanley, J. A. (2019). Pharmacological stress impairs working memory performance and attenuates dorsolateral prefrontal cortex glutamate modulation. *NeuroImage, 186*(September 2018), 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.017>.
- World Medical Association. (2003). Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *TAMA, 310*(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.3917/jib.151.0124>.

### 2.2.1.3. Conclusion

Dans un premier temps, cette étude cherchait à élaborer et évaluer un nouvel outil d'induction du stress d'anticipation. Le *Trier Social Anticipatory Stress (TSAS)* test, développé dans cette étude, est facilement utilisable, peu coûteux et peut être utilisé pour se préparer à faire face à certaines situations stressantes de la vie quotidienne (examen, entretiens d'embauche). Nos résultats montrent que le *TSAS* permet d'engendrer un stress d'anticipation psychophysologique effectif au moins pendant 15 minutes. Suite à l'induction, on observe une augmentation du stress subjectif et du ratio d'évaluation cognitif (c'est-à-dire que les participants jugent leurs ressources internes comme étant insuffisantes pour faire face à la situation qui s'annonce). D'un point de vue physiologique, ce stress d'anticipation se caractérise par une diminution de la cohérence cardiaque (Fig. 37).

Ces résultats confirment les données de la littérature et montrent que l'anticipation d'un événement stressant modifie l'état psychophysologique des individus (Gaab et al., 2005; Juster et al., 2012; Pulooulos et al., 2020). Plusieurs études s'accordent sur le fait qu'un stress d'anticipation induit une augmentation du cortisol (Juster et al., 2012; Pulooulos et al., 2018; Van Paridon et al., 2017). En 2018, Pulooulos et collaborateurs ont montré qu'une baisse importante de la VFC durant la période d'anticipation était associée à une augmentation significative du cortisol pendant l'événement stressant. Ensemble, ces résultats montrent l'importance de déterminer des techniques susceptibles de contribuer à la diminution de la

réponse psychophysiological d'anticipation en vue de limiter la réponse durant l'évènement stressant consécutif.

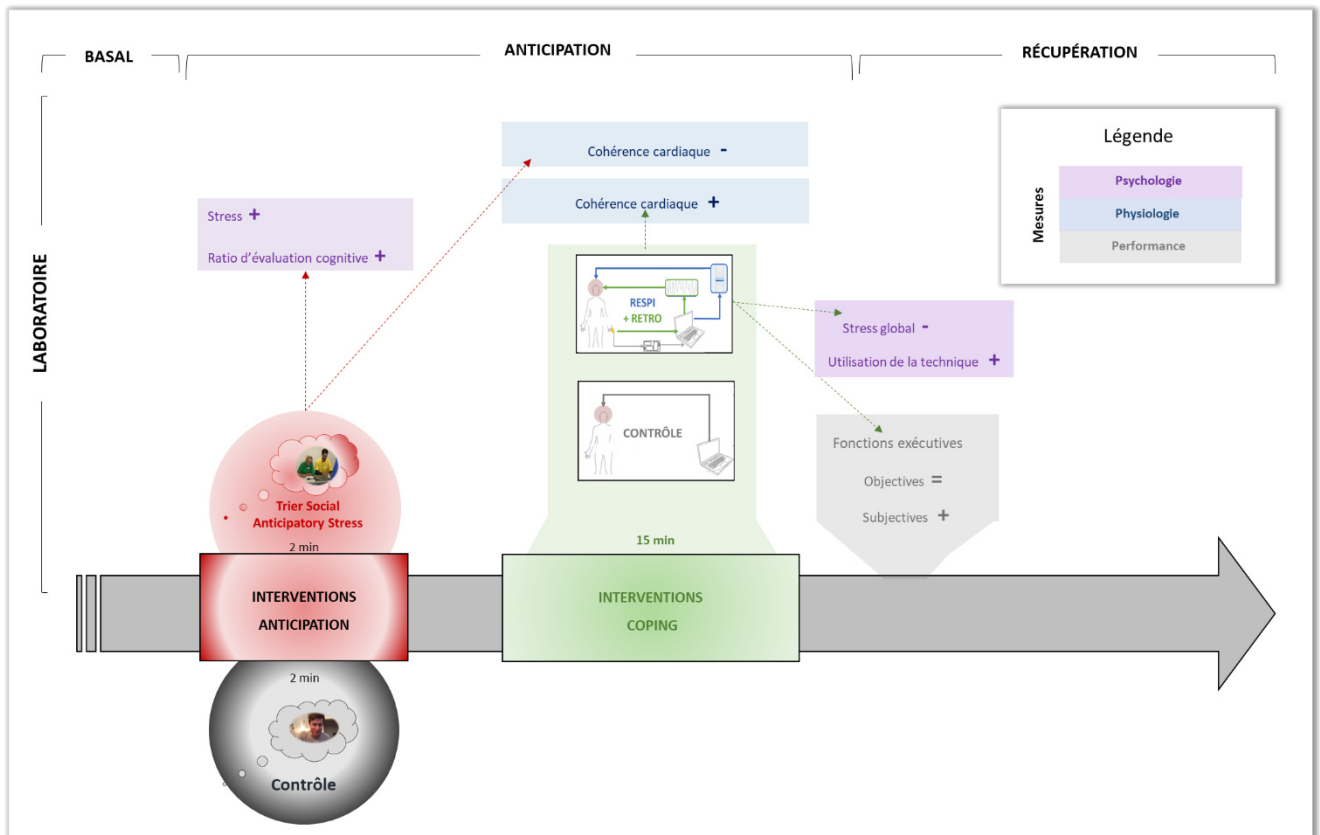


Figure 37. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 3. Le groupe stress d'anticipation a été comparé à un groupe contrôle. Les fonctions exécutives ont été évaluées subjectivement (VAS-performances) et objectivement (WCST, Stroop, verbal fluency, trail letter tests). Ni le stress d'anticipation, ni les interventions de coping n'ont influencé les performances objectives. Cependant le VFC-RETRO permet d'améliorer les performances subjectives. Le stress global représente le ressenti sur l'ensemble de l'expérience et fait référence à la question suivante : « l'intervention vous a-t-elle aidé à diminuer votre stress au cours de l'expérience ? ».

Dans ce contexte, notre étude avait comme second objectif de déterminer si une courte session de VFC-RETRO permettait de diminuer le stress d'anticipation. Nos résultats ont montré que 15 min de VFC-RETRO durant l'anticipation d'un évènement stressant permettaient d'augmenter la cohérence cardiaque et de diminuer le stress subjectif global. De plus le VFC-RETRO bénéficiait d'une très bonne adhésion : les participants ont jugé qu'ils auraient un réel intérêt à réutiliser cette technique dans leur vie personnelle et professionnelle (EVA utilisation). Le VFC-RETRO apparait donc comme une méthode efficace de remédiation du stress d'anticipation.

Nos résultats ont également mis en évidence que la pratique du VFC-RETRO aidait les individus à se sentir plus performants sur des tâches cognitives, bien qu'aucune modification objective des performances exécutives n'ait été observée. Etant donné que les compétences

initiales des individus n'étaient pas évaluées, il est possible que cette différence entre les mesures subjectives et objectives provienne d'un effet groupe. De futurs protocoles en test-re-test, permettant de prendre en compte le niveau de base des individus, et donc de conclure sur les effets réels du VFC-RETRO sur la cognition, restent nécessaires.

D'un point de vue écologique, l'annonce d'un évènement stressant est suivie de l'évènement. Sur la base de nos résultats, il convient dorénavant d'évaluer l'efficacité d'une application préventive du VFC-RETRO dans une réponse de stress générale, c'est-à-dire lorsque la période d'anticipation est réellement suivie par l'évènement stressant annoncé. Etant donné que le TSAS permet d'induire un stress d'anticipation d'au moins 15 min et est compatible avec la survenue réelle d'un évènement stressant (TSAS suivis du stress aigu du TSST), il offre des perspectives de recherche nombreuses. Le TSAS permet notamment l'exploration du potentiel protecteur de différentes techniques appliquées durant la période de stress d'anticipation afin de limiter une réponse de stress aigu et effets délétères associés.

## 2.2.2. Etude 4 : Remédiation du stress par des techniques de stimulations cérébrales et de rétrocontrôle biologique au laboratoire

### 2.2.2.1. Introduction

La période d'anticipation représente un moment clé pour la mise en place de stratégies d'adaptations préventives du stress (Contrada et Baum, 2010; Neupert et al., 2016). Notre étude précédente a montré que le VFC-RETRO est une technique efficace pour diminuer le stress d'anticipation (étude 3). Tout comme le VFC-RETRO, la STCC a été testée comme technique de gestion émotionnelle (Subhani et al., 2018). Une stimulation anodale du CPFdl gauche permettrait de réduire les niveaux de cortisol salivaire, diminuer les réponses de conductance cutanée, et augmenter le contrôle cardiaque vagal pendant le visionnage de stimuli émotionnels négatifs (Brunoni et al., 2013a; Peña-Gómez et al., 2011; Schroeder et al., 2015). Très peu d'études se sont cependant intéressées à l'effet de cette stimulation sur la réponse de stress. À notre connaissance, seul Carnevali et collaborateurs (2019) ont exploré les effets d'une stimulation excitatrice du CPFdl gauche 5 min avant et pendant une situation stressante (TSST). Leurs résultats ont montré une amélioration du contrôle vagal en amont du stressor ainsi qu'une modération de l'accélération de la fréquence cardiaque durant

l'événement stressant. Cependant, la STCC n'était pas appliquée durant un stress d'anticipation, c'est-à-dire que les individus ne savaient pas qu'ils allaient faire face à une situation stressante. Les effets préventifs de la STCC durant un stress d'anticipation restent donc à déterminer.

Ainsi, même si les données de la littérature montrent des effets bénéfiques du VFC-RETRO et de la STCC dans un contexte de régulation émotionnelle, son potentiel effet préventif sur la réponse psychophysologique durant un événement stressant reste à confirmer expérimentalement. L'objectif de ce travail était de déterminer si une courte session de VFC-RETRO et de STCC permettait de diminuer la réponse psychophysologique durant un événement stressant. Des participants ont été exposés à une période de stress d'anticipation, via le TSAS, pendant laquelle ils se sont vu délivrer un VFC-RETRO, reçu une STCC anodale du CPFdl gauche, reçu un VFC-RETRO combiné et la STCC, ou regardé une vidéo sans valence affective (condition contrôle)<sup>43</sup>. Ensuite, tous les participants ont été soumis à un événement stressant (TSST), avant de réaliser une série de tâches cognitives évaluant les fonctions exécutives. Les réponses physiologiques (SDRR, RMSSD, pNN50, LF/HF, cortisol) et l'évolution de l'état psychologique ont été mesurées tout au long de l'expérience (EVA stress, AD-ACL). Les effets des interventions ont également été évalués à posteriori (EVA diminution, EVA performance). En amont de cette expérience, les capacités individuelles sur les tâches cognitives ont été évaluées, permettant de tester les effets de ces interventions sur les fonctions exécutives via un paradigme en test-re-test. Cette nouvelle étude, comparant les effets du VFC-RETRO, de la STCC, et de leur combinaison, devrait permettre de déterminer les effets isolés et cumulés de ces deux approches. Il est attendu que la condition cumulée potentialise les effets bénéfiques individuels attendus du VFC-RETRO et de la STCC.

---

<sup>43</sup> Vidéo diffusée lors de l'expérience, sans son : [https://www.youtube.com/watch?v=BiNI1IoshyA&list=LL\\_JdZWl6BojbAz04wiPGM1g](https://www.youtube.com/watch?v=BiNI1IoshyA&list=LL_JdZWl6BojbAz04wiPGM1g).



### 2.2.2.2. *Manuscript 3: Combining Proactive Transcranial Stimulation and Cardiac Biofeedback to Substantially Manage Harmful Stress Effects*

*Accepté le 21-08-2021 dans Brain Stimulation*

**Sophie SCHLATTER**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

**Aymeric GUILLOT**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

**Laura SCHMIDT**, Université Claude Bernard Lyon 1, Research on Healthcare Performance (RESHAPE), INSERM U1290, Lyon, France

**Mathilde MURA**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

**Robin TRAMA**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

**Franck DIRIENZO**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France

**Marc LILOT**, Université Claude Bernard Lyon 1, Research on Healthcare Performance (RESHAPE), INSERM U1290, Lyon, France. Hospices Civils de Lyon, Departments of Anaesthesia and Intensive Care, University Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France. Centre Lyonnais d'Enseignement par Simulation en Santé (CLESS, high fidelity medical simulation centre), SAMSEI, Lyon, France

**Ursula DEBARNOT**, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology-EA 7424, University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, 69 622 Villeurbanne, France, Institut Universitaire de France (IUF)

#### **ABSTRACT**

**Background:** Previous studies have identified the dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC) as a core region in cognitive emotional regulation. Transcranial direct current stimulations of the dlPFC (tDCS) and heart-rate variability biofeedback (BFB) are known to regulate emotional processes. However, the effect of these interventions applied either alone or concomitantly during an anticipatory stress remains unexplored.

**Objective:** The study investigated the effect of anodal tDCS and BFB, alone or combined, on psychophysiological stress responses and cognitive functioning.

**Methods:** Following a stress anticipation induction, 80 participants were randomized into four groups and subjected to a 15-minute intervention: neutral video viewing (CTRL), left dlPFC anodal tDCS (TDCS), heart-rate variability biofeedback (BFB), or a combined treatment (BFB + TDCS). Participants were then immediately confronted with the stressor, which was followed by an assessment of executive functions. Psychophysiological stress responses were assessed throughout the experiment (heart rate, heart-rate variability, salivary cortisol).

**Results:** The TDCS did not modulate stress responses. Compared with both CTRL and TDCS interventions, BFB reduced physiological stress and improved executive functions after the stressor. The main finding revealed that BFB + TDCS was the most effective intervention, yielding

greater reduction in psychological ( $P = 0.038$ ) and physiological stress responses than BFB ( $P = 0.027$ ).

**Conclusions:** Combining preventive tDCS with BFB is a relevant interventional approach to reduce psychophysiological stress responses, hence offering a new and non-invasive treatment of stress-related disorders. Biofeedback may be particularly useful for preparing for an important stressful event when performance is decisive.

**Keywords:** Brain stimulation, Biofeedback, Executive functions, Coping, Anticipatory stress, Heart-rate variability.

## Introduction

Psychosocially stressful situations are common, and the current COVID-19 pandemic situation has considerably worsened the occurrence of stress-related disorders (Dedoncker et al., 2021). Stress arises when environmental demands exceed the adaptive capacity of the organism, resulting in biological, psychological, and behavioral changes (Contrada and Baum, 2010). The acute stress response, underpinned by the activation of the sympathetic and the withdrawal of the parasympathetic systems, causes an increase both of the activity of the sweat glands and of glucocorticoid secretions and a decrease in heart-rate variability. When this stress response is recurrent, the risk of developing numerous physiological and psychological diseases, such as hypertension, burnout, generalized anxiety disorders, and depression, increases (Contrada and Baum, 2010). The stress response also affects major executive functions, such as working memory, flexibility, and inhibition (Duan et al., 2019; Hsu et al., 2003; Plessow et al., 2012; Schlatter et al., 2020; Schoofs et al., 2008; Taverniers et al., 2010; Woodcock et al., 2019c). Therefore, counteracting deleterious stress effects represents a crucial challenge in improving well-being and facing day-to-day constraints. Recent studies reported that cerebral stimulations and biofeedback might be relevant methods of counteracting particular facets of stress, but their potential preventive effects, notably the avoidance of cognitive deteriorations, remain to be determined (Brunoni et al., 2013a; DeWitte et al., 2019; Peña-Gómez et al., 2011).

Transcranial direct cerebral stimulation (tDCS) is a safe non-invasive technique, enabling the conditioning of the human cortex for up to 60 minutes, whereby anodal and cathodal stimulations respectively induce excitatory and inhibitory effects (Nasseri et al., 2015). Anodal tDCS over the left dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC) has been found to positively affect emotional regulation by reducing the perceived valence of negative stimuli, increasing heart-rate variability, and reducing cortisol levels (Brunoni et al., 2013a; Peña-Gómez et al., 2011). Transcranial stimulation over the left dlPFC further contributed to improving many facets of performances (Dedoncker et al., 2016) such as working memory (Hoy et al., 2013; Ke et al., 2019; Ohn et al., 2008), shifting (Strobach et al., 2015), and inhibition abilities (Jeon and Han, 2012; Loftus et al., 2015). Nevertheless, only one study has tested the effect of anodal left dlPFC stimulation within a stressful context (Carnevali et al., 2019), showing a significant reduction in heart rate reactivity, but effects on cognition were not explored (Carnevali et al.,

2019). In light of these findings, further research investigating the preventive effects of left dIPFC stimulation on stress and cognitive deterioration is therefore warranted.

Another recent promising treatment for promoting emotion regulation is the heart-rate variability biofeedback (BFB) allowing to assess and display cardiac parameters in real time, hence fostering its conscious individual control. When paired with a slow-paced breathing exercise, BFB leads to an increase in heart-rate variability through respiratory sinus arrhythmia (DeWitte et al., 2019; Lehrer et al., 2000; Shaffer et al., 2014). A shift in activation from the sympathetic to the parasympathetic branch of the central nervous system contributes to reducing psychophysiological stress markers (Goessl et al., 2017a; VanDiest et al., 2014). In healthy adults, BFB contributes to improving vagal cardiac control and relaxation and reduces anxiety and subjective stress (Plans et al., 2019; Prinsloo et al., 2013, 2011; Sherlin et al., 2009; Wells et al., 2012). Early data indicated that a 10-minute BFB intervention may improve cognition (Prinsloo et al., 2011). More recently, we found that 15 minutes of BFB improved the subjective performance of core executive functions (Schlatter et al., 2021). Altogether, these results support the efficiency of BFB in stress coping, but its selective influence on executive skills during a stressful event remains to be determined.

The timing of the delivery of a coping intervention remains crucial to eliciting efficient stress management. It has been generally assumed that the stress response occurs in ego-threatening, uncontrollable, and unpredictable situations (Dickerson and Kemeny, 2004). However, in many circumstances, stressful situations can be identified before the occurrence of the stressor (Schlatter et al., 2021). The period of stress anticipation offers a great opportunity to practice preventive coping strategies, which should help to deal with the future stressor. Most of BFB and tDCS interventions have been implemented during or after the occurrence of the stressful event to foster stress recovery (Bogdanov and Schwabe, 2016; Carnevali et al., 2019; DeWitte et al., 2019; Dillon et al., 2016; Plans et al., 2019). Recent data suggest that BFB intervention prior the stressful event contributed to decrease anticipatory stress (Schlatter et al., 2021). Additionally, Carnevali (2019) reported a reduction in physiological stress markers and anxiety when applying tDCS over the left dIPFC just before and during a stressful event. However, they did not assess the effect of the stimulation during the anticipation of a stressful event. Therefore, it remains to be experimentally investigated

how left dlPFC stimulation and BFB during the period of stress anticipation might decrease the subsequent stress response and avoid cognitive deterioration.

The present study aimed to investigate whether heart-rate variability BFB and left dlPFC anodal tDCS during the anticipation of a stressful event might reduce the psychophysiological stress response and prevent further cognitive deterioration. According to the modulating effects elicited by BFB and tDCS *per se*, we tested for the first time their potentiated effects when applied concomitantly.

## **Methods and Materials**

### **2.1. Participants**

Eighty-five healthy volunteers took part in the experiment. To be eligible, participants were required to be over 18 years of age, be right-handed (Edinburgh inventory score of >70), and have normal or corrected-to-normal vision. Exclusion criteria included self-reported history of head injury, regular drug use, contraindications for tDCS (e.g., head implant, pacemaker), diagnosed psychological disorders or chronic disease (e.g., epilepsy), and medication that could influence heart rate (e.g., beta-blockers, anti-anxiety medication). Participants received a detailed informative note and provided a written consent form in line with the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2003). The study was approved by the local institutional review board of the University.

## 2.2. Experimental design

Participants underwent two experimental sessions separated by at least one week ( $10 \pm 3$  days). In the first session, participants were tested in terms of three executive functions (Fig. 38A). In the second session, the impact of four experimental interventions (CTRL, BFB, TDCS, BFB + TDCS) delivered during the anticipation of a stressful event was determined. Immediately afterwards, participants were confronted with the stressor, which was followed by a second assessment of executive functions (Fig. 38B). To limit circadian effects, both sessions were scheduled during the afternoon (noon to 6 pm). Participants were asked to refrain from physical activity and food and caffeine intake two hours before testing. Five participants were excluded from the analysis due to not obeying the instructions, leading to a final sample of 80 participants ( $22.71 \pm 6.16$  years old; 40 women; body mass index:  $21.48 \pm 2.18$ ).

## 2.3. First experimental session

Participants were seated on a chair approximately 50 cm from a 17-inch computer screen. Anxiety trait (State-Trait-Anxiety Inventory; STAI-Y-B; Cronbach's  $\alpha$  .90), level of vigilance (Stanford Sleepiness Scale; SSS), and level of subjective stress (Visual Analogue Scale 10 cm; VAS stress, from *zero* to *maximum*) were assessed (Hoddes et al., 1973; Spielberger et al., 1983).

### 2.3.1. Cognition

Participants undertook three randomized cognitive tasks assessing three main executive functions: shifting (Switch), working memory (3-Back), and inhibition (Stroop) (Fig. 16; voir

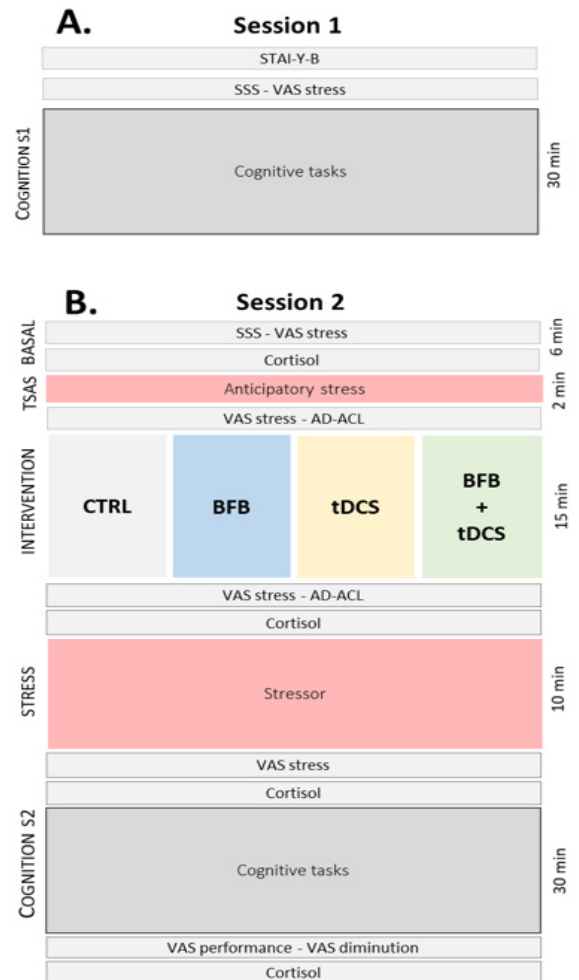


Figure 38. Protocol. The cognitive tasks (Switch, 3-Back, Stroop) assessed the abilities of executive functions. The anticipatory stress was induced with Trier Social Anticipatory Stress (TSAS). Then, participants were randomly assigned to one of four intervention groups: neutral video (CTRL), heart-rate variability biofeedback (BFB), anodal dorsolateral prefrontal cortex stimulation (TDCS), or a combined method (BFB + TDCS). The acute stress was induced with the jury confrontation in the Trier Social Stress Test (TSST). Stress markers were assessed at different time-points (State-Trait-Anxiety Inventory; STAI-Y-B, Stanford Sleepiness Scale; SSS, Visual Analogue Scale; VAS stress, Activation-Deactivation Adjective Check List; AD-ACL, VAS performance, VAS diminution, cortisol) and continuously (cardiac parameters).

page 56)<sup>44</sup>. Behavioral data were collected using the software PsyToolkit (Stoet, 2017, 2010). For all tasks, the maximal response time was 2 s, and feedback was provided. For the Switch task, the participants made a cued binary decision about one of two possible tasks (color or shape). For the 3-Back task, participants had to determine if a letter had earlier appeared three times among 15 possible letters that were presented separately in a randomized order. For the Stroop task, participants were asked to identify the colors of written words while ignoring the meaning of the word. We assessed the global effect on executive performance by calculating two general performance scores based on error rates (ERs) and response times (RTs; in milliseconds) in each task:

$$(1) \text{ error score: } (ER_{\text{Switch}} + ER_{\text{3-Back}} + ER_{\text{Stroop}})/3$$

$$(2) \text{ response time score: } (RT_{\text{Switch}} + RT_{\text{3-Back}} + RT_{\text{Stroop}})/3$$

#### 2.4. Second experimental session

Participants were first equipped with a connected tee-shirt allowing continuous tracking of cardiac activities (Hexoskin™; Carre Technologies Inc., Montreal, Canada). Then, the experiment was divided into five main periods: 6-minute baseline (BASAL), anticipatory stress induction (Trier Social Anticipatory Stress; TSAS), intervention (INTERVENTION), stressor occurrence (STRESS), and cognitive tasks (COGNITION S2) (Fig. 38B). The same three executive functioning tasks were performed in the second experimental sessions.

---

<sup>44</sup> Switch: Participants were asked to make a cued binary decision about one of two possible tasks (color or shape). Following 20 practice trials, the evaluation tasks alternated randomly across 80 assessment trials. The maximal response time was 2 s, and feedback was provided. The primary outcomes were the average response time (RT) (correct responses only) and the total number of errors (ER).  
3-Back: Participants had to identify if a letter had earlier appeared three times among 15 possible letters. Letters appeared separately in a randomized order across 10 practice trials and 80 assessment trials. The maximal response time was 2 s, and feedback was provided. The primary outcomes were the average RT (correct responses only) and the total ER.  
Stroop: The colors of written words were identified while ignoring the meaning of the word. After 20 practice trials, participants performed 80 assessment trials, with randomized congruent and incongruent trials. Maximal response time was 2 s, and feedback was provided. The primary outcomes were the average RT (correct responses only) and the total ER.

### 2.4.1. Anticipatory Stress

For the stress anticipation induction, participants performed the Trier Social Anticipatory Stress test (TSAS; 23). Participants were informed that, after 15 minutes of video viewing, breathing exercise, or cerebral stimulation, a panel of two people would evaluate their performance in two tasks (i.e. a job interview and mental arithmetic). The panel was always presented as hierarchical superiors of the experimenter. Participants were informed that performances would be video-recorded. Then, the experimenter left the room for 2 minutes.

### 2.4.2. Interventions

Once the experimenter returned to the experimental room, all participants were equipped with an ear pulse sensor recording their cardiac activity at 370 Hz (emWavePRO®; HeartMath Technologies; Add Heart®). Subsequently, they were allocated to a 15-minute intervention following an *a priori* stratified randomization controlling for gender proportion: neutral video (CTRL, n = 20), heart-rate variability BFB (BFB, n = 20), dlPFC tDCS (TDCS, n = 20), or dlPFC tDCS paired with BFB (BFB + TDCS, n = 20).

#### Heart-rate variability biofeedback

For the BFB and BFB + TDCS interventions, the experimenter presented the visual interface composed of the cardiorespiratory signal and the breathing cursor displayed on a 17-inch computer screen (emWavePRO® interface). Participants were instructed to follow a standardized visual breathing cursor, leading inspiration and expiration at a rate of 6 breaths/min (Fig. 39).

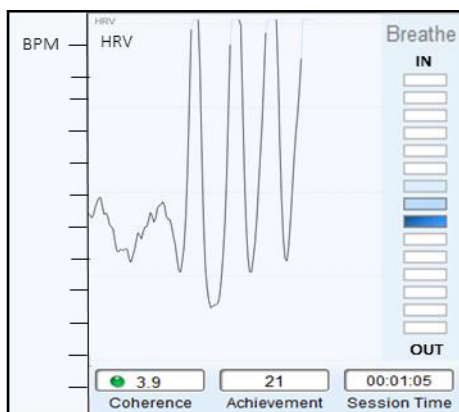


Figure 39. Biofeedback intervention: emWavePRO® visual interface. The biofeedback intervention required viewing, in real time, cardiac parameters (left) paired with a standardized breathing exercise lead by a visual cursor (right). The curve draws the instantaneous heart rate. HRV: heart-rate variability; BPM: beats per minute. Immediate coherence and cumulative coherence (achievement) were displayed. The coherence score was formulated as follows:  $(\text{Peak Pwr}/[\text{Total Pwr} - \text{Peak Pwr}])$  on a minute-by-minute basis (1,2). Participants were instructed to perform two cycles of maximal inhalation/expiration. Standardized instructions indicated that the more the signal represented a pretty and regular curve, the more the participants would be in cardiac coherence. The participants were further informed that the immediate and cumulative coherence scores and the time of the intervention would be displayed on the screen. They were instructed to reach, through the help of the visual interface, the highest possible score of coherence. To do so, they were told to follow a standardized visual breathing cursor, leading the inspiration and expiration cycles at a rate of 6 breaths/min.



### ***Transcranial direct cerebral stimulation***

The tDCS (NIC2, NE®, v2.0.11.1, Barcelona, Spain) intervention was delivered in both the TDCS and BFB + TDCS groups through two saline-soaked sponge electrodes (25 cm<sup>2</sup>). An anode was localized over the left dIPFC and a cathode over the contralateral supraorbital area, referred to as F3 and Fp2, respectively (International 10–20 System). Electric stimulation was delivered for 15 min at 1.6 mA (current density = 0.064 mA/cm<sup>2</sup>), including 30 s of ramp-up/-down time (Fig. 40).

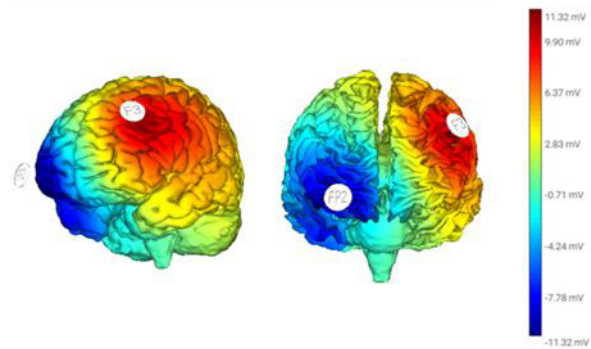


Figure 40. Model of electric field induced by left dorsolateral prefrontal cortex anodal stimulation. For transcranial direct cerebral stimulation (tDCS) interventions, an anode was situated over the left dorsolateral prefrontal cortex (F3) and a cathode placed over the contralateral supraorbital area (Fp2), according to the International 10–20 system. tDCS is a safe, non-invasive method.

### **2.4.3. Stress**

Immediately after the intervention, the experimenter left the room, while the panel of two people arrived. The panel always consisted of a woman and a man, who were unknown by the participant and blind to the type of prior intervention. The participants then underwent the Trier Social Stress Test (STRESS), which consisted of 5 min of a mock job interview followed by 5 min of a difficult mental arithmetic task in front of the panel composed of two cold experimenters (Kirschbaum et al., 1993; Shields and Slavich, 2017).

## **2.5. Dependent variables controlling psychophysiological stress**

### ***2.5.1. Instantaneous psychometric measures***

All participants rated how stressfully they experienced the immediate situation (VAS stress) at the beginning of session 2 (BASAL) and after the TSAS, the INTERVENTION, and the STRESS. Before and after the INTERVENTION, they completed the Activation–Deactivation Adjective Check List (AD-ACL) assessing the evolution of their relaxation and activation levels (Thayer, 1967). Internal consistency across the AD-ACL subscales at both measure points was acceptable (Cronbach’s  $\alpha$  .77 to .88).

### **2.5.2. Autonomic nervous system measures**

The participants' average heart rates were recorded during the five experimental periods (BASAL, TSAS, INTERVENTION, STRESS, COGNITION S2). According to taskforce recommendations, heart-rate variability parameters were extracted from 5-minutes segments in the BASAL, INTERVENTION, STRESS, and COGNITION S2 periods. The detection of artifacts and extraction of time and frequency domains were performed using MATLAB software (R2019a®). For the time domain, we calculated the root mean square successive difference (RMSSD, in ms), the standard deviation of R–R intervals (SDRR, in ms), and the percentage of successive normal R–R intervals differing by more than 50 ms (pNN50, in ms). For the frequency domain, we quantified the power of low (LF: 0.04–0.15 Hz) and high (HF: 0.15–0.4 Hz) frequencies, then the ratio LF/HF was calculated. Saliva samples were collected before the BASAL and after the INTERVENTION, STRESS, and COGNITION S2 periods. Salivettes devices (Sarstedt®) were conserved in ice before centrifugation (5 min, 5,000 rpm) and stored at –20°C. Salivary cortisol concentrations were assayed using a competitive enzyme-linked immunosorbent kit (Cortisol ELISA kit; abcam®).

### **2.5.3. Debriefing judgments**

After the COGNITION S2 period, participants rated how the intervention enabled them to reduce their overall stress (VAS diminution, from *absolutely not* to *completely*) and influenced their performance in the cognitive tasks (VAS performance, from *negatively* to *positively*).

## **2.6. Statistical analysis**

Statistical analyses were performed using the R freeware (v3.6.3). We used linear mixed effects with a by-subject random intercept (lme function, nlme package) (Pineiro et al., 2014). All models tested the GROUP × TIME interaction. To investigate the effect on VAS stress and heart rate, we entered TIME (BASAL, TSAS, INTERVENTION, STRESS, COGNITION S2) and GROUP (CTRL, BFB, TDCS, BFB + TDCS) as fixed effects. To examine the effect of GROUP on relaxation and activation levels, we entered TIME (PRE-INTERVENTION, POST-INTERVENTION) and GROUP. For heart-rate variability and cortisol analyses, we entered TIME (BASAL, INTERVENTION, STRESS, COGNITION S2) and GROUP as fixed effects. The effect on cognition (error score and response time score) was analyzed with TIME (SESSION 1, SESSION 2) and GROUP as fixed effects. The effects of GROUP on debriefing judgments (VAS diminution, VAS performance) were investigated with one-way ANOVAs. Visual inspection of the residual plots did not reveal any obvious deviation from

homoscedasticity or normality. The statistical significance threshold was set for a type 1 error rate of  $\alpha = 5\%$ . Holm correction for multiple *post-hoc* testing was employed. Effects sizes were determined for GROUP ( $R_p^2$  and  $\eta^2$ ), TIME ( $R_p^2$ ), and GROUP  $\times$  TIME ( $R_p^2$ ), while Cohen's  $d$  were provided when comparing two groups. The intended sample size was calculated using G\*Power (v3.1.9.4) for repeated measures and within-between interaction design. An a priori power calculation based on medium effect size ( $f = 0.20$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $1 - \beta = 0.85$ ) resulted in a total sample size of 76 participants (Brunoni and Vanderhasselt, 2014). To prevent probable attrition, data losses or both, we recruited 10% additional volunteers ( $n = 85$ ).

## Results

All groups were equivalent in terms of demographic characteristics and exhibited similar anxiety traits and depressive symptoms. At the beginning of both sessions, all groups were also similar in subjective stress (VAS stress) and vigilance level (SSS).

### 3.1. Analysis of dependent variables controlling psychophysiological stress

All significant GROUP  $\times$  TIME interactions are presented in Tableaux 1 and 2. All TIME and GROUP effects with *post-hoc* comparisons are detailed (Annexes 13).

#### 3.1.1. Instantaneous psychometric measures

The analysis of VAS stress revealed no GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[12] = 18.69$ ,  $p = 0.10$ ), whereas the data for relaxation level showed a GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[3] = 16.14$ ,  $p = 0.001$ ,  $R_p^2 = 0.03$ ); during the intervention, the relaxation level increased considerably more in the BFB + TDCS than in the CTRL group. A GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[3] = 12.89$ ,  $p < 0.01$ ,  $R_p^2 = 0.04$ ) was also found for the activation level, the decrease in activation being higher in the BFB + TDCS than in both CTRL and TDCS groups (Tableau 1).

Tableau 1. TIME  $\times$  GROUP interactions for psychological stress markers. Values are expressed as estimated difference  $\pm$  standard error (SE). Significant and trend ( $p < 0.10$ ) *post-hoc* comparisons are in bold.

TIME	GROUP	AD-ACL relaxation			AD-ACL activation		
		estimate	SE	p value	estimate	SE	p value
PRE-INTERVENTION	CTRL VS BFB	- 0.39	0.19	0.197	0.23	0.26	1.000
	CTRL VS TDCS	- 0.36	0.19	0.197	0.10	0.26	1.000
	CTRL VS BFB + TDCS	- 0.76	0.19	<b>0.001</b>	0.85	0.26	<b>0.010</b>
VS	BFB VS TDCS	0.03	0.19	0.891	- 0.12	0.26	1.000
POST-INTERVENTION	BFB VS BFB + TDCS	- 0.37	0.19	0.197	0.63	0.26	<b>0.075</b>
	TDCS VS BFB + TDCS	- 0.40	0.19	0.197	0.75	0.26	<b>0.027</b>

### 3.1.2. Autonomic nervous system measures

#### Heart rate and heart-rate variability

Analysis of heart rate showed no GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[12] = 13.09, p = 0.362$ ). Analysis of heart-rate variability showed a trend on RMSSD ( $\chi^2[9] = 16.55, p = 0.056$ ). Significant GROUP  $\times$  TIME interactions were found for SDRR (Fig. 41A;  $\chi^2[9] = 36.49, p < 0.0001, R_p^2 = 0.05$ ) and pNNS50 values ( $\chi^2[9] = 21.30, p = 0.011, R_p^2 = 0.03$ ). The model of the LF/HF ratio also revealed an interaction (Fig. 41B;  $\chi^2[9] = 236.21, p < 0.0001, R_p^2 = 0.26$ ). Overall, *post-hoc* tests systematically demonstrated an advantage for interventions including BFB (i.e., BFB and TDCS + BFB) and additionally revealed a greater improvement in LF/HF ratio following TDCS + BFB intervention (Table 2). The improvement in LF/HF ratio is driven by an improvement of LF.

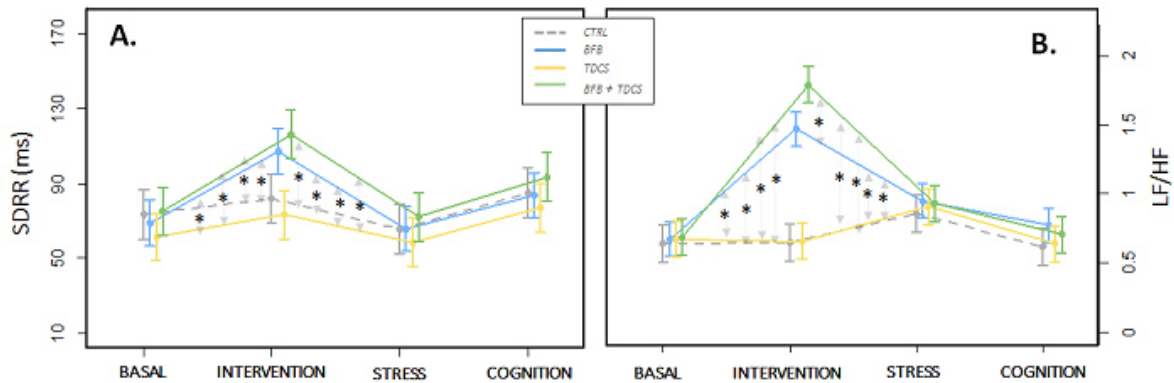


Figure 41. Evolution of heart-rate variability. The figure displays GROUP  $\times$  TIME interactions with 95% confidence intervals. (A) SDRR. (B) LF/HF ratio.

Tableau 2. TIME × GROUP interactions for physiological stress markers. Values are expressed as estimated difference ± standard error (SE). Significant and trend ( $p < 0.10$ ) post-hoc comparisons are in bold.

TIME	GROUP	SDRR			pNN50			LF/HF		
		estimate	SE	p value	estimate	SE	p value	estimate	SE	p value
BASAL VS INTERVENTION	CTRL VS BFB	-29.77	8.04	<b>0.010</b>	-5.75	3.85	1.000	-0.786	0.106	<b>&lt;0.001</b>
	CTRL VS TDCS	-3.53	8.24	1.000	-0.23	3.95	1.000	0.023	0.108	1.000
	CTRL VS BFB + TDCS	-32.81	8.24	<b>0.003</b>	-10.11	3.95	0.390	-1.095	0.108	<b>&lt;0.001</b>
	BFB VS TDCS	26.23	7.92	<b>0.031</b>	5.53	3.79	1.000	0.809	0.104	<b>&lt;0.001</b>
	BFB VS BFB + TDCS	-3.04	7.92	1.000	-4.35	3.79	1.000	-0.309	0.104	<b>0.073</b>
	TDCS VS BFB + TDCS	-29.28	8.12	<b>0.013</b>	-9.88	3.89	0.402	-1.119	0.107	<b>&lt;0.001</b>
INTERVENTION VS STRESS	CTRL VS BFB	-25.47	8.24	<b>0.043</b>	-5.68	3.85	1.000	-0.728	0.106	<b>&lt;0.001</b>
	CTRL VS TDCS	1.20	8.24	1.000	-5.05	3.95	1.000	0.040	0.108	1.000
	CTRL VS BFB + TDCS	-28.37	8.24	<b>0.022</b>	-14.58	3.95	<b>0.010</b>	-1.070	0.108	<b>&lt;0.001</b>
	BFB VS TDCS	26.68	7.92	<b>0.027</b>	0.63	3.79	1.000	0.768	0.104	<b>&lt;0.001</b>
	BFB VS BFB + TDCS	-2.89	7.92	1.000	-8.90	3.79	0.615	-0.342	0.104	<b>0.027</b>
	TDCS VS BFB + TDCS	-29.57	8.12	<b>0.012</b>	-9.53	3.89	0.500	-1.110	0.107	<b>&lt;0.001</b>
STRESS VS COGNITION S2	CTRL VS BFB	-1.11	8.04	1.000	1.98	3.85	1.000	0.062	0.106	1.000
	CTRL VS TDCS	-1.08	8.24	1.000	8.54	3.95	0.917	-0.028	0.108	1.000
	CTRL VS BFB + TDCS	2.15	8.24	1.000	8.78	3.95	0.817	0.016	0.108	1.000
	BFB VS TDCS	0.03	7.92	1.000	6.56	3.79	1.000	-0.090	0.104	1.000
	BFB VS BFB + TDCS	3.26	7.92	1.000	6.79	3.79	1.000	-0.046	0.104	1.000
	TDCS VS BFB + TDCS	3.23	8.12	1.000	0.24	3.89	1.000	0.043	0.107	1.000

### **Cortisol**

No significant GROUP × TIME interaction was observed ( $\chi^2[9] = 10.86, p = 0.285$ ).

#### **3.1.2. Debriefing judgments**

The ANOVA on VAS diminution revealed a GROUP effect ( $F_{3,76} = 6.39, p < 0.001, \eta^2 = 0.20$ ; Fig. 42A). Scores were higher in the BFB + TDCS than in the CTRL (Cohen's  $d = 1.29$ ), BFB (Cohen's  $d = 0.81$ ), and TDCS groups (Cohen's  $d = 1.25$ ), highlighting that combined intervention was judged as the most efficient intervention for reducing stress. The ANOVA on VAS performance revealed a main GROUP effect ( $F_{3,76} = 7.47, p < 0.001, \eta^2 = 0.23$ ). Participants in both BFB groups estimated that the intervention had a positive impact on their cognitive performance, and this impact was better compared to the CTRL (CTRL vs BFB Cohen's  $d = 0.94$ , CTRL vs BFB + TDCS Cohen's  $d = 1.27$ ) and TDCS groups (TDCS vs BFB Cohen's  $d = 0.82$ , TDCS vs BFB + TDCS Cohen's  $d = 1.13$ ) (Fig. 42B).

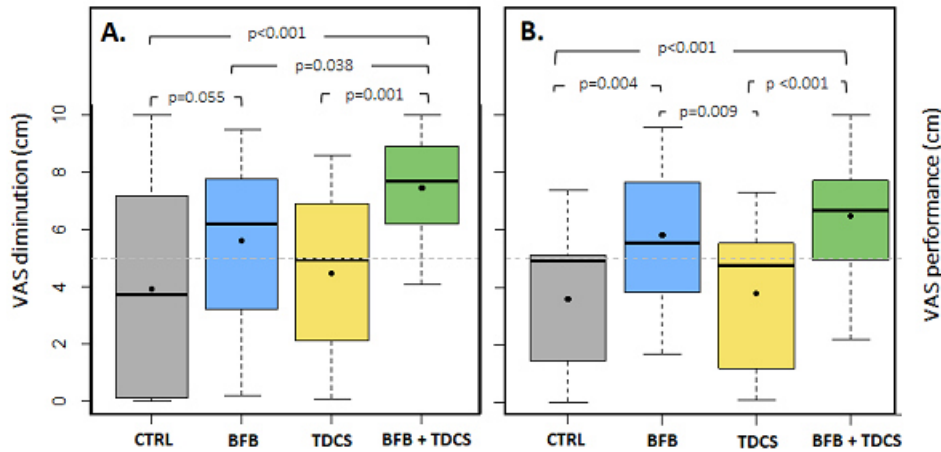


Figure 42. Debriefing judgments. (A) Subjective impact of the intervention on global stress diminution (from 0 = absolutely not, to 10 = completely). (B) Subjective impact of the intervention on performance (from 0 = negative, to 10 = positive). A score equal to five represented a null effect.

### 3.2. Analysis of executive cognitive functions

Analysis of error rates revealed a GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[3] = 14.58, p = 0.002, R_p^2 = 0.03$ ), showing that improvement in accuracy was greater in the BFB group (Tableau 3). In addition, improvement was slightly higher in the BFB + TDCS than in the TDCS group (no significant). Analysis of response times showed no GROUP  $\times$  TIME interaction ( $\chi^2[3] = 5.04, p = 0.168$ ). No GROUP effect was detected either in error rate ( $\chi^2(3) = 1.07, p = 0.784$ ) and in response time ( $\chi^2(3) = 4.41, p = 0.221$ ) scores. A TIME effect was detected in error rate score ( $\chi^2(1) = 33.91, p < 0.001, R_p^2 = 0.10$ ) and in response time score ( $\chi^2(1) = 81.50, p < 0.001, R_p^2 = 0.18$ ).

Tableau 3. Performances scores. Values expressed are means  $\pm$  standard deviation. ER: Error rate.

TIME	GROUP	Error score		
		estimate	SE	p value
SESSION 1	CTRL VS BFB	1.48	0.55	<b>0.044</b>
	CTRL VS TDCS	- 0.40	0.56	0.799
	CTRL VS BFB + TDCS	1.00	0.57	0.240
vs	BFB VS TDCS	- 1.88	0.56	<b>0.007</b>
SESSION 2	BFB VS BFB + TDCS	- 0.48	0.57	0.799
	TDCS VS BFB + TDCS	1.40	0.57	<b>0.066</b>

## Discussion

This study investigated whether interventions of dlPFC anodal tDCS and BFB delivered – alone or concomitantly – during an anticipatory stress period might contribute to decreasing the psychophysiological stress response and further preserve executive abilities. The findings revealed a selective effect of these treatments on the psychological, physiological, and cognitive responses of stress. Proactive short BFB treatment reduced physiological stress and improved accuracy performances in executive functions, while combining BFB with tDCS strongly alleviated physiological and psychological stress responses. No effects of tDCS over the dlPFC were detected, when applied alone.

The first main finding of the present study is that physiological responses of stress were substantially reduced after 15 minutes of BFB applied alone during the anticipation of a stressful event. Participants subjected to the BFB experienced improved heart-rate variability features (SDRR, pNN50, LF/HF). Heart-rate variability is a reliable indicator of the adaptability of an organism and can be considered a relevant marker of health (Berry et al., 2014; DeWitte et al., 2019; Gevirtz, 2013; Goessel et al., 2017a; Shaffer et al., 2014). Our results reinforce previous findings suggesting that BFB is an efficient coping method for reducing psychophysiological stress responses (Prinsloo et al., 2013, 2011; Sherlin et al., 2009; Wells et al., 2012; Whited et al., 2014). More importantly, present data showed that proactive BFB has long-lasting effects on cognitive responses; following the stressful event, participants from the BFB group had the greatest improvement in the accuracy of executive functioning. The cognitive benefits induced by BFB intervention were reinforced by the subjective ratings. Both BFB groups, alone or combined with tDCS, judged that their intervention had a positive influence on their cognitive abilities. Although exploration of BFB effects on cognitive performance remains sparse (Prinsloo et al., 2011; Schlatter et al., 2021), the positive impact of BFB on sport performance has been investigated more extensively (Jiménez Morgan and Molina Mora, 2017). Together, our results extend previous findings supporting the benefits of BFB on performance. Furthermore, our findings demonstrated, for the first time, the preventive effects of BFB applied during an anticipatory stress on following cognitive performance.

A second important finding is that combining BFB and tDCS contributed substantially to managing stress. The concomitant effect of the BFB + tDCS intervention induced a significant

improvement in heart-rate variability along with a strongly potentiated LF/HF ratio. The LF/HF ratio provides information about the relationship of vagal input to the other causes of variability (Malliani A, 2005; Shaffer et al., 2014; Shaffer and Ginsberg, 2017). During periods of slow respiration rates, vagal activity generates oscillations in the LF band (Shaffer and Ginsberg, 2017). Thus, here high LF/HF ratio is ought to reflect a greater vagal cardiac control. A recent review article highlighted the importance of stimulating the vagus nerve for improving resilience, notably for coping with the COVID-19 (Dedoncker et al., 2021). The improvement is thought to rely on body–mind interactions, which are carried out via a bidirectional communication pathway between the central nervous system and the body through the vagus nerve (Dedoncker et al., 2021). Here, the increased LH/HF ratio through the BFB + TDCS intervention might offer an efficient non-invasive method of simulating the vagus nerve. The subjective assessments also confirmed the positive effects of combining BFB and tDCS, which led to a greater level of relaxation during the anticipation period, similarly the debriefing judgments attested the highest decrease in the perceived stress throughout the experiment.

These original results demonstrate that the combined BFB + TDCS intervention is a relevant, safe, and effective proactive coping method. In addition, our results provided empirical data for the recent hypothesis of Mather and Thayer (2018), who suggested that high-amplitude oscillations in heart rate induce oscillatory activity in the brain, which enhances connectivity in the brain networks associated with emotion regulation (e.g., amygdala, medial prefrontal regions) (Mather and Thayer, 2018). Multi-sessions of BFB and anodal tDCS over the left dlPFC were found to substantially decrease stress-related symptoms in individuals suffering from generalized anxiety disorders, post-traumatic stress syndrome, and depression (Berry et al., 2014; Boggio et al., 2008; Caldwell and Steffen, 2018; Hallman et al., 2011; Martens et al., 1990; Meyer et al., 2018; Siepmann et al., 2008). The present results are therefore of major importance for the design of innovative combined BFB and tDCS interventions and should now be confirmed in patients suffering from stress-related disorders before being implemented in clinical settings. While fixed 6 bpm breathing is convenient and efficient (Meier and Welch, 2016; Schlatter et al., 2021; Shaffer et al., 2014; Wells et al., 2012), future studies investigating long term effects of combined BFB and tDCS might benefit from a priori determination of individual resonance frequency following Lehrer's procedure [22]. Training individual to their



own respiratory frequency is expected to be more comfortable for participant and further potentiate the biofeedback effectiveness of repeated interventions. Finally, the impact of BFB + TDCS on executive functions revealed mixed effects. Although debriefing judgments suggested that participants in the BFB + TDCS group felt that they were more efficient during cognitive assessments, behavioral data were not congruent. As the BFB + TDCS participants demonstrated the lowest score in activation level following the intervention, we postulate that a deactivation might have affected the optimal arousal level needed to perform well in the cognitive tasks (Delignières, 1993). This remains a working hypothesis awaiting further experimental investigation.

Surprisingly, our data did not reveal significant improvement in psychophysiological stress markers and cognition following the TDCS intervention. To date, there is no clear consensus regarding the effects of dlPFC stimulation on emotional regulation. Some authors reported no impact at all (DeWitte et al., 2020; Marques et al., 2018), whereas others observed greater emotional regulation (Brunoni et al., 2013c, 2013a; Carnevali et al., 2019). One possible explanation for this discrepancy may relate to the difference in the timing of the stimulation, where benefits to emotional regulation might be restricted to concomitant stimulation and stress event occurrence (Carnevali et al., 2019). Similarly, positive effects on cognition were most frequently reported when the cerebral stimulation was applied during the cognitive tasks (Ankri et al., 2020; Ikeda et al., 2019). The lack of further improvement in cognition in the TDCS group might also be explained by the site of the stimulation (Brunoni et al., 2012). Other sites of stimulation, such as the inferior frontal gyrus, the inferior frontal cortex, or the left parietal cortex, might be more relevantly targeted to increase cognitive performance (Debarnot et al., 2019; Giustolisi et al., 2018; Hertenstein et al., 2019; Hogeveen et al., 2016). One another possible explanation for the absence of tDCS effects is the relatively low spatial resolution of tDCS, which enable cortical areas adjacent to the dlPFC to also receive stimulation. Nevertheless, the brain current density is expected to be highest in cortical areas that are directly below the anodal electrode and decreases as the distance from the electrodes increases (Miranda et al., 2006; Wagner et al., 2014). Overall, interpreting the lack of effects of tDCS in the present study remains difficult due to the absence of previous experimental work dealing with the interaction between stress, cerebral stimulation, and cognition. Futures

investigations should specifically examine the optimal tDCS parameters that might contribute to emotional regulation in the context of stress.

This study had some limitations. As executive function skills are highly dependent on the individual, this study opted for an intra-individual design to limit group effects. One unexpected finding was the improvement of both response time and accuracy in all groups, supporting a learning effect without additional enhancement after cerebral stimulation. It is possible that a learning effect somewhat masked putative additional benefit. An important point to raise is the self-reported nature of disease, smoking habit, and/or drug use by the participants when engaging in the experiment. As no physical or laboratory examination was performed, one cannot completely exclude the possibility of hidden chronic disease or drug use in this population, which may have influenced the effects of the intervention. Further studies controlling for learning effects are also necessary to understand in greater detail how BFB and tDCS may interact with cognition in a stress context. Finally, our design did not include sham groups, and future studies might include sham-condition and/or a reversed polarity brain stimulation setting. In particular, the effects of preventive sham-tDCS paired with biofeedback should be considered for a better understanding of the additional effects of tDCS.

### **Conclusions**

To conclude, stress is an important societal problem inducing numerous consequences in wellbeing and health, and the development of effective methods that can be applied before the occurrence of a stressful event are necessary to prevent the earliest possible manifestation of stress. The present findings demonstrated the additive contribution of short proactive BFB with left dlPFC stimulation in reducing the psychophysiological stress response. While applying tDCS before a day-to-day stressful event might not be easily achievable, its application in the clinical setting seems appropriate (Brunoni et al., 2012). Multi-sessions of BFB practice and left dlPFC stimulation have been independently established as relevant techniques in a clinical population suffering from stress disorders. Accordingly, our results provide a rationale for further exploration of whether BFB paired with left dlPFC stimulation might alleviate stress-related disorders. In addition, we found, for the first time, that delivering a short BFB intervention during the stress-anticipation period was likely to improve executive performance. As BFB offers rapid effects without being resource intensive, present

results encourage the practice of BFB in real-life stress-anticipation events where a high level of performance is expected, such as before a job interview or sport competition.

## 5. References

- Ankri YLE, Braw Y, Luboshits G, Meiron O. The effects of stress and transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory: A randomized controlled trial. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2020;20:103–14. <https://doi.org/10.3758/s13415-019-00755-7>.
- Berry ME, Chapple IT, Ginsberg JP, Gleichauf KJ, Meyer JA, Nagpal ML. Non-pharmacological Intervention for Chronic Pain in Veterans: A Pilot Study of Heart Rate Variability Biofeedback. *Glob Adv Heal Med* 2014;3:28–33. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2013.075>.
- Bogdanov M, Schwabe L. Transcranial stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex prevents stress-induced working memory deficits. *J Neurosci* 2016;36:1429–37. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3687-15.2016>.
- Boggio PS, Rigonatti SP, Ribeiro RB, Myczkowski ML, Nitsche MA, Pascual-leone A, et al. A randomized, double-blind clinical trial on the efficacy of cortical direct current stimulation for the treatment of major depression. *Int J Neuropsychopharmacol* 2008;11:249–54. <https://doi.org/10.1017/S1461145707007833.A>.
- Brunoni AR, Zanao TA, Vanderhasselt M, Valiengo L, De Oliveira JF, Boggio PS, et al. Enhancement of Affective Processing Induced by Bifrontal Transcranial Direct Current Stimulation in Patients With Major Depression. *Neuromodulation* 2013;17:138–42. <https://doi.org/10.1111/ner.12080>.
- Brunoni AR, Nitsche MA, Bolognini N, Bikson M, Wagner T, Merabet L, et al. Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): Challenges and future directions. *Brain Stimul* 2012;5:175–95. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.03.002>.
- Brunoni AR, Vanderhasselt M, Boggio PS, Fregni F, Dantas EM, Mill JG, et al. Polarity- and valence-dependent effects of prefrontal transcranial direct current stimulation on heart rate variability and salivary cortisol. *Psychoneuroendocrinology* 2013;38:58–66. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2012.04.020>.
- Brunoni AR, Vanderhasselt MA. Working memory improvement with non-invasive brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex: A systematic review and meta-analysis. *Brain Cogn* 2014;86:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.01.008>.
- Caldwell YT, Steffen PR. Adding HRV biofeedback to psychotherapy increases heart rate variability and improves the treatment of major depressive disorder. *Int J Psychophysiol* 2018;131:96–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.01.001>.
- Carnevali L, Pattini E, Sgoifo A, Ottaviani C. Effects of prefrontal transcranial direct current stimulation on autonomic and neuroendocrine responses to psychosocial stress in healthy humans. *Stress* 2019;0:1–11. <https://doi.org/10.1080/10253890.2019.1625884>.
- Contrada RJ, Baum A, editors. *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. Springer P. New York: 2010.
- Debarnot U, Schlatter S, Monteil J, Guillot A. Early stimulation of the left posterior parietal cortex promotes representation change in problem solving. *Sci Rep* 2019;9:16523. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52668-7>.
- Dedoncker J, Vanderhasselt M-A, Ottaviani C, Slavich GM. Mental Health During the Covid-19 Pandemic and Beyond: the Importance of the Vagus Nerve for Biopsychosocial Resilience. *Neurosci Biobehav Rev* 2021;125:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.010>.
- Dedoncker J, Brunoni AR, Baeken C, Vanderhasselt MA. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Healthy and Neuropsychiatric Samples: Influence of Stimulation Parameters. *Brain Stimul* 2016;9:501–17. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.006>.
- Delignières D. Anxiété et performance. In: J.P. Famose, editor. *Cogn. Perform.*, Paris: INSEP; 1993, p. 235–54.
- DeWitte S, Baeken C, Pulpulos MM, Josephy H, Schiettecatte J, Anckaert E, et al. The effect of neurostimulation applied to the left dorsolateral prefrontal cortex on post-stress adaptation as a function of depressive brooding. *Prog Neuro-Psychopharmacology Biol Psychiatry* 2020;96:109687. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2019.109687>.
- DeWitte NAI, Buyck I, Van Daele T. Combining Biofeedback with Stress Management Interventions: A Systematic Review of Physiological and Psychological Effects. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2019;0:1–14. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-09427-7>.

Dickerson SS, Kemeny ME. Acute Stressors and Cortisol Responses: A Theoretical Integration and Synthesis of Laboratory Research. *Psychol Bull* 2004;130:355–91. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.3.355>.

Dillon A, Kelly M, Robertson IH, Robertson DA. Smartphone applications utilizing biofeedback can aid stress reduction. *Front Psychol* 2016;7:832. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>.

Duan H, Wang X, Hu W, Kounios J. Effects of acute stress on divergent and convergent problem-solving. *Think Reason* 2019;0:1–19. <https://doi.org/10.1080/13546783.2019.1572539>.

Gevirtz R. The Promise of Heart Rate Variability Biofeedback: Evidence-Based Applications. *Biofeedback* 2013;41:110–20. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.01>.

Giustolisi B, Vergallito A, Cecchetto C, Varoli E, Romero Lauro LJ. Anodal transcranial direct current stimulation over left inferior frontal gyrus enhances sentence comprehension. *Brain Lang* 2018;176:36–41. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.11.001>.

Goessl VC, Curtiss JE, Hofmann SG. The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety: A meta-analysis. *Psychol Med* 2017;47:2578–86. <https://doi.org/10.1017/S0033291717001003>.

Hallman DM, Olsson EMG, von Scheele B, Melin L, Lyskov E. Effects of Heart Rate Variability Biofeedback in Subjects with Stress-Related Chronic Neck Pain: A Pilot Study. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2011;36:71–80. <https://doi.org/10.1007/s10484-011-9147-0>.

Hertenstein E, Waibel E, Frase L, Riemann D, Feige B, Nitsche MA, et al. Modulation of creativity by transcranial direct current stimulation. *Brain Stimul* 2019;1–9. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.06.004>.

Hoddes E, Zarcone V, Smythe H, Phillips R, Dement W. Quantification of Sleepiness: A New Approach. *Psychophysiology* 1973;10:431–6.

Hogeveen J, Grafman J, Abozeria M, David A, Bikson M, Hauner KK. Effects of High-Definition and Conventional tDCS on Response Inhibition. *Brain Stimul* 2016;9:720–9. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.015>.

Hoy KE, Emonson MRL, Arnold SL, Thomson RH, Daskalakis ZJ, Fitzgerald PB. Testing the limits: Investigating the effect of tDCS dose on working memory enhancement in healthy controls. *Neuropsychologia* 2013;51:1777–84. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.018>.

Hsu FC, Garside MJ, Massey AE, McAllister-Williams RH. Effects of a single dose of cortisol on the neural correlates of episodic memory and error processing in healthy volunteers. *Psychopharmacology (Berl)* 2003;167:431–42. <https://doi.org/10.1007/s00213-003-1413-2>.

Ikeda T, Takahashi T, Hiraishi H, Saito DN, Kikuchi M. Anodal transcranial direct current stimulation induces high gamma-band activity in the left dorsolateral prefrontal cortex during a working memory task: A double-blind, randomized, crossover study. *Front Hum Neurosci* 2019;13:1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00136>.

Jeon SY, Han SJ. Improvement of the working memory and naming by transcranial direct current stimulation. *Ann Rehabil Med* 2012;36:585–95. <https://doi.org/10.5535/arm.2012.36.5.585>.

Jiménez Morgan S, Molina Mora JA. Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Sport Performance, a Systematic Review. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2017;42:235–45. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>.

Ke Y, Wang N, Du J, Kong L, Liu S, Xu M, et al. The effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory training in healthy young adults. *Front Hum Neurosci* 2019;13:1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00019>.

Kirschbaum C, Pirke KM, Hellhammer DH. The 'Trier Social Stress Test' - a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology* 1993;28:76–81. <https://doi.org/119004>.

Lehrer P, Vaschillo E, Vaschillo B. Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability : Rationale and manual for training. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2000;25:177–91. <https://doi.org/10.1023/A>.

Loftus AM, Yalcin O, Baughman FD, Vanman EJ, Hagger MS. The impact of transcranial direct current stimulation on inhibitory control in young adults. *Brain Behav* 2015;0:e00332. <https://doi.org/10.1002/brb3.332>.

Malliani A. Heart rate variability: from bench to bedside. *Eur J Intern Med* 2005;16:12–20.

Mather M, Thayer JF. How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Curr Opin Behav Sci* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.12.017>.

Marques LM, Morello LYN, Boggio PS. Ventrolateral but not Dorsolateral Prefrontal Cortex tDCS effectively impact emotion reappraisal – effects on Emotional Experience and Interbeat Interval. *Sci Rep* 2018;8:15295. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33711-5>.

Martens R, Vealey RS, Burton D. *Competitive Anxiety in Sport*. Champaign, Illinois: Human Kinetics; 1990.

Meier NF, Welch AS. Walking versus biofeedback: a comparison of acute interventions for stressed students. *Anxiety, Stress Coping* 2016;29:463–78. <https://doi.org/10.1080/10615806.2015.1085514>.

Meyer P, Friederich H, Zastrow A. Breathe to ease - Respiratory biofeedback to improve heart rate variability and coping with stress in obese patients : A pilot study. *Ment Heal Prev* 2018;11:41–6. <https://doi.org/10.1016/j.mhp.2018.06.001>.

Miranda PC, Lomarev M, Hallett M. Modeling the current distribution during transcranial direct current stimulation. *Clin Neurophysiol* 2006;117:1623–9. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.009>.

Nasseri P, Nitsche MA, Ekhtiari H. A framework for categorizing electrode montages in transcranial direct current stimulation. *Front Hum Neurosci* 2015;9:1–5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00054>.

Ohn SH, Park C, Yoo WK, Ko MH, Choi KP, Kim GM, et al. Time-dependent effect of transcranial direct current stimulation on the enhancement of working memory. *Neuroreport* 2008;19:43–7. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282f2adfd>.

Peña-Gómez C, Vidal-Piñero D, Clemente IC, Pascual-Leone Á, Bartrés-Faz D. Down-regulation of negative emotional processing by transcranial direct current stimulation: Effects of personality characteristics. *PLoS One* 2011;6:e22812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022812>.

Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D. *Linear and nonlinear mixed effects models*. R Packag Version 3 2014.

Plans D, Morelli D, Sütterlin S, Ollis L, Derbyshire G, Cropley M. Use of a biofeedback breathing app to augment poststress physiological recovery: Randomized pilot study. *J Med Internet Res* 2019;21:1–8. <https://doi.org/10.2196/12227>.

Plessow F, Schade S, Kirschbaum C, Fischer R. Better not to deal with two tasks at the same time when stressed ? Acute psychosocial stress reduces task shielding in dual-task performance. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2012;12:557–70. <https://doi.org/10.3758/s13415-012-0098-6>.

Prinsloo GE, Rauch HGL, Lambert MI, Muench F, Noakes TD, Derman WE. The effect of short duration heart rate variability (HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Appl Cogn Psychol* 2011;25:792–801. <https://doi.org/10.1002/acp.1750>.

Prinsloo GE, Derman WE, Lambert MI, Laurie Rauch HG. The effect of a single session of short duration biofeedback-induced deep breathing on measures of heart rate variability during laboratory-induced cognitive stress: A pilot study. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2013;38:81–90. <https://doi.org/10.1007/s10484-013-9210-0>.

Schlatter S, Guillot A, Faes C, Saruco E, Collet C, Di Rienzo F, et al. Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study. *Int J Psychophysiol* 2020;152:62–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011>.

Schlatter S, Schmidt L, Lilot M, Guillot A, Debarnot U. Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress. *Behav Res Ther* 2021;0:accepted. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103834>.

Shields GS, Slavich GM. Lifetime stress exposure and health: A review of contemporary assessment methods and biological mechanisms. *Soc Personal Psychol Compass* 2017;11:1–17. <https://doi.org/10.1111/spc3.12335>.

Schoofs D, Preuß D, Wolf OT. Psychosocial stress induces working memory impairments in an n-back paradigm. *Psychoneuroendocrinology* 2008;33:643–53. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.02.004>.

Shaffer F, McCraty R, Zerr CL. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart’s anatomy and heart rate variability. *Front Psychol* 2014;5:1–19. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>.

Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front Public Heal* 2017;5:1–17. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.

Sherlin L, Gevirtz R, Wyckoff S, Muench F. Effects of Respiratory Sinus Arrhythmia Biofeedback Versus Passive Biofeedback Control. *Int J Stress Manag* 2009;16:233–48. <https://doi.org/10.1037/a0016047>.

Siepmann M, Aykac V, Unterdörfer J, Petrowski K, Mueck-Weymann M. A pilot study on the effects of heart rate variability biofeedback in patients with depression and in healthy subjects. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2008;33:195–201. <https://doi.org/10.1007/s10484-008-9064-z>.

Spielberger C, Gorsuch R, Lushene P, Vagg P, Jacobs A. Manual for the State Trait Anxiety Inventory (Form Y). Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.; 1983.

Stoet G. PsyToolkit: A software package for programming psychological experiments using Linux. *Behav Res Methods* 2010;42:1096–104. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.4.1096>.

Stoet G. PsyToolkit: A Novel Web-Based Method for Running Online Questionnaires and Reaction-Time Experiments. *Teach Psychol* 2017;44:24–31. <https://doi.org/10.1177/0098628316677643>.

Strobach T, Soutschek A, Antonenko D, Flöel A, Schubert T. Modulation of executive control in dual tasks with transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuropsychologia* 2015;68:8–20. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.12.024>.

Taverniers J, Van Ruysseveldt J, Smeets T, Von Grumbkow J. High-intensity stress elicits robust cortisol increases, and impairs working memory and visuo-spatial declarative memory in Special forces candidates: A field experiment. *Stress* 2010;13:323–33. <https://doi.org/10.3109/10253891003642394>.

Thayer RE. Measurement of activation through self-report. *Psychol Rep* 1967;20:663–78.

VanDiest I, Verstappen K, Aubert AE, Widjaja D, Vansteenwegen D, Vlemincx E. Inhalation/Exhalation Ratio Modulates the Effect of Slow Breathing on Heart Rate Variability and Relaxation. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2014;39:171–80. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9253-x>.

Wagner S, Rampersad SM, Aydin Ü, Vorwerk J, Oostendorp TF, Neuling T, et al. Investigation of tDCS volume conduction effects in a highly realistic head model. *J Neural Eng* 2014;11:016002. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/1/016002>.

Wells R, Outhred T, Heathers JAJ, Quintana DS, Kemp AH. Matter Over Mind: A Randomised-Controlled Trial of Single-Session Biofeedback Training on Performance Anxiety and Heart Rate Variability in Musicians. *PLoS One* 2012;7:e46597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046597>.

Whited A, Larkin KT, Whited M. Effectiveness of emWave biofeedback in improving heart rate variability reactivity to and recovery from stress. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2014;39:75–88. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9243-z>.

Woodcock EA, Greenwald MK, Khatib D, Diwadkar VA, Stanley JA. Pharmacological stress impairs working memory performance and attenuates dorsolateral prefrontal cortex glutamate modulation. *Neuroimage* 2019;186:437–45. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.017>.

World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *TAMA* 2003;310:2191–4. <https://doi.org/10.3917/jib.151.0124>.

### 2.2.2.3. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer si une STCC anodale du CPFdl et un VFC-RETRO appliqués seuls ou de manière concomitante pendant une période de stress d'anticipation pouvaient contribuer à diminuer la réponse psychophysiological de stress et à préserver les capacités exécutives. Une courte application de VFC-RETRO a réduit le stress physiologique et amélioré les performances exécutives, tandis que la combinaison de VFC-RETRO et de la STCC a fortement atténué les réponses physiologiques et psychologiques de stress (Fig. 43).

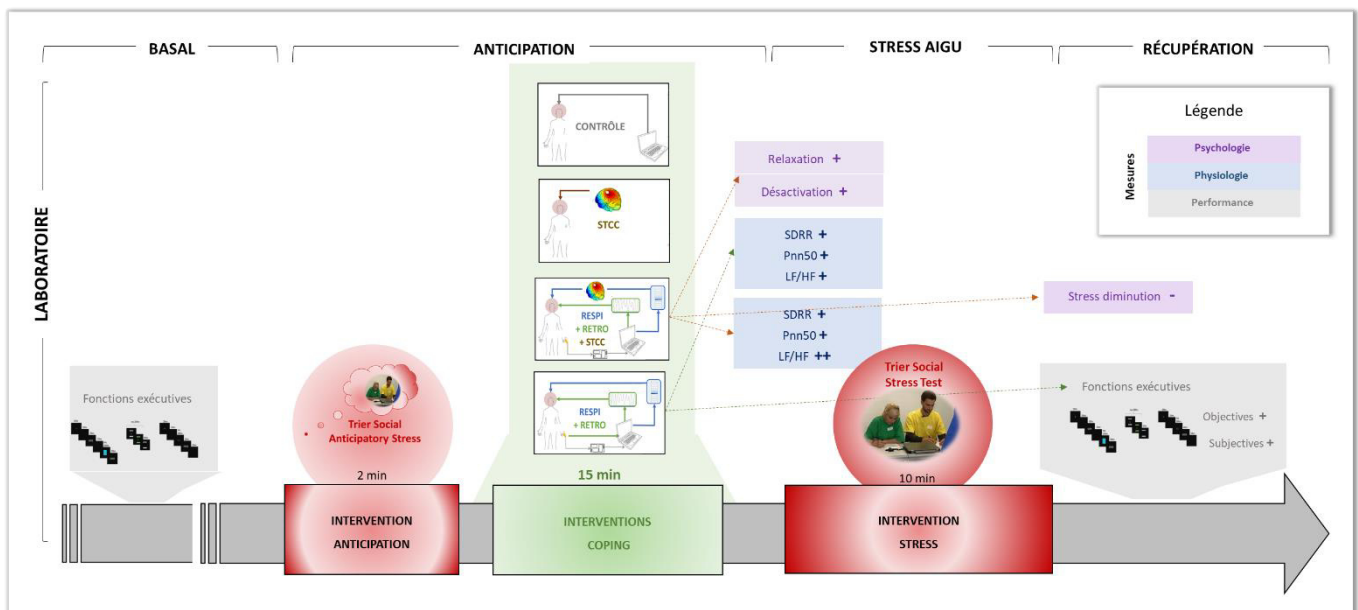


Figure 43. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 4. Les fonctions exécutives ont été évaluées subjectivement (VAS-performances) et objectivement (Switch, 3-Back, Stroop). La STCC appliquée seule ne modère pas la réponse psychophysiological et ne modifie pas les performances. Le VFC-RETRO seule permet de diminuer les marqueurs physiologiques du stress (SDRR, pNN50, LF/HF) et d'améliorer les performances subjectives et objectives. Lorsque la STCC et le VFC-RETRO sont combinés, on observe une amélioration potentialisée, à la fois sur les marqueurs psychologiques immédiats (relaxation) et retardés (stress global) et sur les réponses physiologiques (LF/HF potentialisé).

Notre étude n'a pas montré d'effets de la STCC appliquée seule. Cependant lorsqu'elle est appliquée de manière concomitante au VFC-RETRO, les effets sur les marqueurs psychophysiological du stress ont été potentialisés. En effet, la combinaison de la STCC avec le VFC-RETRO a permis une plus grande diminution des marqueurs du stress physiologique (ratio LF/HF) et psychologique (EVA stress diminution), que la condition VFC-RETRO seule. Cette technique cumulée ouvre des perspectives d'application pour le traitement des pathologies associées au stress où les symptômes psychophysiological sont conséquents (stress post traumatique, dépression, anxiété généralisée). Chez ces patients la STCC et le VFC-RETRO, appliqués lors de sessions répétées et de manière isolée, ont montré une amélioration de la qualité de vie (Boggio et al., 2008; Caldwell et Steffen, 2018)<sup>45</sup>. Même si nos résultats méritent d'être répliqués chez ces patients, les données suggèrent que les bénéfices isolés de ces techniques pourraient être potentialisés par leur combinaison. Ces bienfaits pourraient se traduire par une diminution du nombre de séances nécessaires et/ou une limitation du nombre de rechutes dans le cas de la dépression.

Les résultats de nos deux études précédentes mettent en lumière l'efficacité du VFC-RETRO pour diminuer les marqueurs du stress psychophysiological et augmenter les

<sup>45</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : techniques de gestion émotionnelle

performances (études 3, 4). Le VFC-RETRO est très facile et rapide à mettre en place, devenant une alternative attractive pour appliquer des procédures de remédiation du stress en contexte écologique où la pression temporelle est importante et les performances déterminantes. Les professionnels de santé impliqués dans les services d'urgences et de soins intensifs prennent en charge des patients en conditions critiques, nécessitant de fait des capacités cognitives inaltérées malgré une surcharge émotionnelle et une pression temporelle importante (Isbell et al., 2020; Leblanc, 2009). Dans ce contexte, le VFC-RETRO pourrait les aider à contrôler leur stress. Dorénavant, il convient de valider l'adhésion à cette technique et de déterminer si les effets psychophysiologiques et cognitifs observés en laboratoire sont transposables au stress professionnel.

Afin d'explorer ces différents points, nous avons mis en place une étude de terrain permettant de définir l'efficacité du VFC-RETRO lors d'un stress écologique, c'est-à-dire lors d'une prise en charge de patients en soins critiques par des professionnels de santé (étude 5). L'étude du stress professionnel nous a été permis par le développement d'un partenariat entre le Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité et le Centre Lyonnais d'Enseignement par la Simulation en Santé (<http://cless.univ-lyon1.fr/>) (études 5, 6, 7).

### 2.2.3. Etude 5 : Remédiation du stress par des techniques de respiration et de rétrocontrôle biologique dans un contexte écologique

#### 2.2.3.1. Introduction

L'anesthésiologie est reconnue comme l'une des spécialités médicales les plus stressantes (Sanfilippo et al., 2017). Le stress vécu par les soignants est associé à une diminution de la qualité des soins prodigués et un risque accru d'incidents affectant la sécurité des patients (Panagioti et al., 2018). La simulation haute-fidélité en santé permet de reproduire fidèlement des scénarios d'urgence et de soins intensifs et de créer des niveaux de stress similaires à ceux de la pratique réelle (Dias et Neto, 2016). Ainsi, les simulations haute-fidélités offrent un cadre de recherche idéal pour observer les effets du stress et des techniques de gestion émotionnelle de manière contrôlée et sans risque pour les patients. Dans de nombreuses circonstances cliniques, les situations stressantes peuvent être identifiées et appréhendées en amont. Dans ces conditions, la période d'anticipation offre une excellente occasion de pratiquer des stratégies d'adaptations préventives pour faire face à l'évènement stressant qui



suivra. Nos premières études ont montré que délivrer un VFC-RETRO durant un stress d'anticipation est particulièrement utile pour se préparer à un événement stressant et limiter le déclin cognitif associé au stress (études 3, 4). Cependant, ses potentiels effets préventifs dans des contextes de stress inhérents à la pratique professionnelle clinique, restaient inexplorés.

Dans nos protocoles précédents, le VFC-RETRO était toujours couplé à la pratique d'un exercice de respiration relaxante, ce qui ne permettait pas de distinguer les effets spécifiques du VFC-RETRO de ceux de la respiration (études 3, 4). Etant donné qu'un exercice de respiration semble plus facile à mettre en place, déterminer l'apport potentiel du VFC-RETRO, surtout dans un contexte professionnel où la pression temporelle est grande, semble important. Dès lors, le but de cette étude était de déterminer l'impact de 5 minutes de respiration relaxante préventive, avec ou sans VFC-RETRO, réalisées avant la prise en charge d'une situation clinique critique stressante sur *i*) le niveau de stress psychologique durant l'anticipation, et *ii*) les performances techniques et non techniques des internes, c'est-à-dire la qualité de leur prise en charge.

#### 2.2.3.2. *Manuscript 4 : Effects of relaxing standardized breathing paired with cardiac biofeedback on performance and relaxation during critical simulated situations : A prospective randomized controlled trial*

*Soumis dans BMC education 04-08-21*

**Sophie T Schlatter**, (PhD)<sup>a\*</sup>, **Corentin C Thérond**, (MD)<sup>b</sup>, **Aymeric Guillot**, (PhD)<sup>a</sup>, **Simon P Louisy**, (MD)<sup>b</sup>, **Antoine Duclos**, (PhD)<sup>c,d</sup>, **Jean-Jacques Lehot**, (PhD)<sup>b,d,e</sup>, **Thomas Rimmelé**, (PhD)<sup>b,e,f</sup>, **Ursula S Debarnot**, (PhD)<sup>a,g</sup>, **Marc E Lilot**, (PhD)<sup>b,d,e</sup>

a. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, F-69622 Villeurbanne, France.

b. Hospices Civils de Lyon, Departments of Anesthesia and Intensive Care, Lyon, France.

c. Hospices Civils de Lyon, Health Data Department, Lyon, France.

d. Research on Healthcare Performance (RESHAPE), INSERM U1290, Claude Bernard Lyon 1 University, Lyon, France.

e. Claude Bernard Lyon 1 University, Centre Lyonnais d'Enseignement par Simulation en Santé (CLESS, high fidelity medical simulation center), SAMSEI, Lyon, France.

f. EA 7426 "Pathophysiology of Injury-Induced Immunosuppression" (Pi3), Université Claude Bernard Lyon, Biomérieux-Hospices Civils de Lyon, Lyon, France.

g. Institut Universitaire de France.

**Running title:** Relaxing breathing & biofeedback effects on performance in simulation

## **Abstract**

**Background.** Active participation in high-fidelity simulation remains stressful for residents. Increased stress levels elicited during such simulation impacts performance. We tested whether relaxing breathing, paired or not with cardiac biofeedback, could lead to enhanced performance of residents during simulation.

**Methods.** This randomized pilot study involved the fifth-year anesthesiology and critical care residents who participated in high-fidelity at Lyon medical simulation center in 2019. Residents were randomized into three parallel interventions: relaxing breathing, relaxing breathing paired with cardiac biofeedback, and control. Each intervention was applied for five minutes immediately after the scenario briefing. The primary endpoint was the overall performance during the simulation rated by two blinded independent investigators. The secondary endpoints included changes in psychological states.

**Results.** Thirty-four residents were included. Compared to the control group, residents in the relaxing breathing (+ 7%, 98.3% CI: 0.3 to 13.7,  $P = 0.013$ ) and relaxing breathing paired with cardiac biofeedback (+ 8%, 98.3% CI: 0.82 to 14.81,  $P = 0.009$ ) groups had a higher overall performance score. Following the interventions, compared to the control group, stress level was lower when participants had performed relaxing breathing alone ( $P = 0.029$ ) or paired with biofeedback ( $P = 0.035$ ). Internal relaxation level was higher in both the relaxing breathing alone ( $P = 0.016$ ) and paired with biofeedback groups ( $P = 0.035$ ).

**Conclusions.** Performing five minutes of relaxing breathing before the scenario resulted in better overall simulation performance. These preliminary findings suggest that short breathing interventions are efficient to improve performance during simulation.

**Trial registration:** The study protocol was registered on [clinicaltrials.gov](https://clinicaltrials.gov) (NCT04141124, Marc Lilot).

**Keywords:** Biofeedback, Critical situation, Performance, Relaxing breathing, Simulation, Stress

## 1. Introduction

Healthcare professionals dealing with emergencies and critical care regularly experience sudden feelings of acute stress which can be associated with performance deterioration in both technical and non-technical skills.<sup>1-4</sup> Stress management techniques (SMT) have been reported as effective approaches to reduce the intensity of the stress reaction. Regular training in SMT was further reported to reduce sleep disorders, burnout and depression, all long-term stress-related effects.<sup>5,6</sup> Spurred by these benefits, routine use of SMT was proposed to help healthcare practitioners dealing with stressful critical events. However, the impact of acute interventions remains less explored.<sup>6-8</sup> In many clinical situations, stress can be predicted before the occurrence of the actual stressor (e.g., expecting a new patient in a context of bed saturation, anticipated arrival of an emergency). The early identification of the subsequent stressor leads to a period of anticipatory stress. During this anticipation a preventive coping method might be applied in order to decrease the following stress response, while intending to improve the performance during the following critical events.<sup>9</sup>

Breathing exercises are a core element of relaxation techniques that could be used as SMT. Breathing can be slowed down to a constant regular rate leading to a respiratory sinus arrhythmia that contributes to a shift towards the parasympathetic central nervous system, increasing relaxation, and reducing stress levels.<sup>10</sup> Providing information on physiological responses is a promising alternative to reduce physiological and psychological stress indicators.<sup>11,12</sup> In healthy participants, cardiac biofeedback training leads to a reduction in self-reported stress and anxiety.<sup>13</sup> Additionally, a recent study reported that acute use of such techniques might help to maintain optimal cognitive abilities.<sup>14</sup> However, the acute effects of these techniques on performance, in clinical professional stress context, remain unexplored. Simulation offers interesting immersive and realistic context, without exposing patients to risk, for studying the effects of SMT before implementation in clinical practice.

High-fidelity simulation has been formally implemented in the curriculum of residents to improve their performance notably in critical clinical situations, through the development of technical and non-technical skills.<sup>15-17</sup> However, simulation can also induce high stress levels, impacting these skills during the scenario.<sup>2,3,18,19</sup> The benefit of a short period of relaxing breathing paired with biofeedback on the overall performance and stress level experienced during high-fidelity simulation remains unexplored. The main hypothesis was that five minutes

of proactive relaxing breathing, with or without concurrent biofeedback, performed prior to the scenario would improve performance during simulated critical care situations. We also hypothesized that these short interventions may reduce the anticipatory stress induced before the simulation. The cardiac biofeedback was expected to potentiate the effect on relaxation level.

## **2. Material and Methods**

### **2.1. Ethics approval / license / Registration**

The study protocol was approved by the Institutional Review Board of Claude Bernard University Lyon 1, Lyon, France (n°IRB 2019\_07\_09\_03, July 2019) and written consent was obtained from all subjects before participating in the trial. The research was performed in accordance with the Declaration of Helsinki. The trial was registered at clinicaltrials.gov (NCT04141124, Date of registration: 28 October 2019). The results were reported using the Consolidated Standards of Reporting Trials guidelines.<sup>20</sup>

### **2.2. Population and setting**

This study involved all fifth-year anaesthesiology and critical care residents from Lyon University who participated in high-fidelity simulation at the Lyon medical simulation centre in 2019. No exclusion criteria were applied. Simulations were part of the resident educational program and each session lasted four to five hours. During each session, four different scenarios ran consecutively, the order of scenarios was maintained during each session. Each resident participated individually in one scenario. Simulations were always structured as follows: briefing (one to five min), scenario (10 to 20 min), and debriefing (30 to 45 min).<sup>21–23</sup> The scenarios dealt with crisis situations in the intensive care unit, operating room, and delivery room (TAMPONADE, NEONATAL, AMNIOTIC FLUID, PACEMAKER), no residents performed these scenarios beforehand (App. A). For each scenario, the instructor playing the embedded nurse acted as neutrally as possible. SimMan Essential® and SimNewB® manikins (Laerdal Medical AS, Stavanger, Norway) were used.

### **2.3. Design**

This prospective randomized controlled study involved three parallel arms and a hypothesis of superiority (1:1:1 allocation). Two sessions of simulation were performed by day

(one in the morning and one in the afternoon). A blinded investigator assigned each session of simulation to one intervention (RB, BFB + RB, CONTROL). Then, following simple computerized randomization procedures, residents were randomly allocated to a session of simulation.

Upon arrival, residents were informed about the study and told that the research was interested in well-being during simulation. They were briefly informed that they will perform a breathing exercise at various time of the session of simulation (before the scenario or after the debriefing). Participants were blinded to working hypotheses and randomization procedure

The intervention was performed, right after the briefing, by the main investigator in an isolated room, such as all instructors leading the simulation were blinded to the group allocation. The same investigator (S.S.) conducted each intervention and the active participant sat on a chair, the investigator stayed in the room and verified that residents performed their interventions.

The three interventions were (Fig.44):

- A) RB: Residents from the relaxing breathing (RB) group received standardized relaxing breathing. The resident was asked to follow, for five minutes, a standardized rhythm of breathing, with an inspiration for four seconds and expiration of six seconds (Supplemental Fig.1). The standardized relaxing breathing was guided by looking at a video on a computer. No visual cardiac biofeedback was provided.
- B) BFB + RB: The resident from the heart rate variability biofeedback paired with relaxing breathing group (BFB + RB), were asked to follow the same standardized breathing as in the RB group. The standardized relaxing breathing was guided by looking at a smartphone screen (Iphone 5S™, Apple, cupertino, CA, USA) and a heart rate variability-biofeedback was provided on the same screen through a connection with a cardio frequency meter placed on the resident's ear lobe (Stress control™, My Mercurochrome®, Paris, France). Through the help of the interface, residents were asked to try to increase their heart rate variability.
- C) CONTROL: Residents from the control group reviewed normal printed laboratory test results. They were informed that those tests were unrelated to the scenario. The resident was asked to read the results for five minutes. This control condition has been

used in previous study, and might be seen as a usual normal standardized clinical practice.<sup>24–26</sup>

Each intervention was conducted in a standardized manner for 5 min. Afterwards, the participant went directly to the simulation room and the scenario started. All included residents had received a formal training in Tactics to Optimize the Potential in 2017.<sup>24</sup> These tactics combined specific tools of mental preparation such as mental imagery and projection of success with cognitive toolboxes.

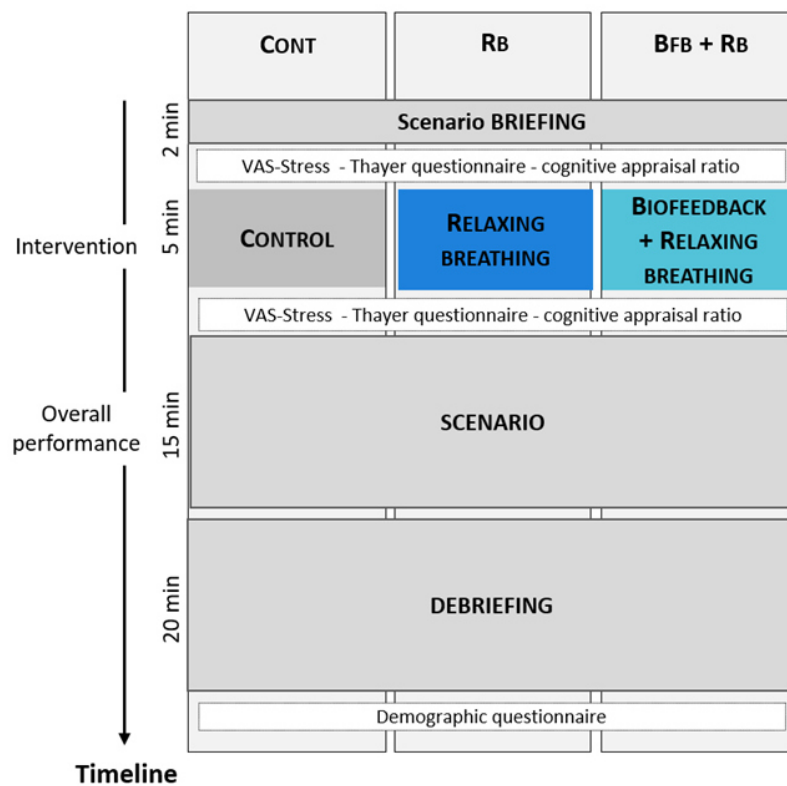


Figure 44. Timeline of the experimental design. VAS: Visual Analogue Scale. The active resident received the briefing of the scenario first, followed by the intervention, the scenario, and the debriefing. The breathing intervention consisted of a relaxing breathing exercise (iterative sequence of 4 s of inspiration and 6 s of expiration). The biofeedback + relaxing breathing intervention corresponded to the relaxing breathing exercise paired with the viewing of real-time cardiac parameters. Overall performance corresponded to both technical (clinical specific evaluation grid) and non-technical skills (Ottawa scale) performance.

#### **2.4. Performance evaluation**

Two assessors (M.L./C.T.) blinded to group allocation evaluated performances independently using video recordings.

**Clinical specific evaluation score.** Each scenario used a specific checklist which was established beforehand to assess clinical performance. Each checklist was composed of items associated with a number of points so that the total reached 100. These checklists have been extensively described previously.<sup>25,26</sup>

**Non-technical skills evaluation score.** For each scenario, the Ottawa Crisis resource management Global Rating Scale (Ottawa GRS) was used to assess non-technical skills. Ratings for the six criteria were summed, scores ranging from 6 to 42 points.<sup>27</sup>

For each resident, the average of the two assessors' scores for each performance (clinical specific or non-technical skills) was computed.

#### **2.5. Questionnaires**

Before and after the intervention, each resident completed a 10 cm Visual Analogue Scale (VAS) of stress (VAS-Stress), Participants also answered the Thayer questionnaire (Activation-Deactivation Adjective Check List).<sup>29</sup> The Thayer questionnaire is a multidimensional questionnaire of transitory arousal states [5 to 20 points], including energetic (activation, deactivation) and tense (tension, relaxation) arousals. All residents filled out a questionnaire on demographic data and the BIG-5 personality inventory assessing 5 dimensions of personality (Openness, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism).<sup>30</sup> Neuroticism is known to confer a particular vulnerability to stress.<sup>31</sup>

#### **2.6. Endpoints**

The primary endpoint was the mean overall performance during simulation. This endpoint was calculated as the sum of the clinical performance score out of 100 points plus the Ottawa scale score (6 to 42) adjusted to a scale of 100 points (score /42\*100). The sum was then divided by two to obtain an overall score between zero and 100 points. Secondary endpoints were clinical performance, Ottawa scale scores, VAS-Stress, Thayer questionnaire scores (relaxation, tension, activation, deactivation), and cognitive appraisal ratio.

## 2.7. Statistical analyses

The Consolidated Standards of Reporting Trial is presented in Figure 45. Statistical analyses were performed with R studio version 1.2.1335 (R Foundation, Vienna, Austria). All tests were two-tailed. Visual assessments were used to confirm normality of data distribution with histograms and quantile-quantile plots. For all performance measures, inter-rater reliability of investigators was assessed by calculating absolute interclass correlation coefficients and 95% CI for individual measures (package DescTools, ICC function); agreement was interpreted according to Cichetti.<sup>32</sup> We assessed the treatment effect on performance (overall, technical skills and non-technical skills) using an analysis of variance including main effects of group (RB, BFB + RB, CONTROL) and scenario, and assessing the group-by-scenario interaction. Results are presented as differences in mean between groups with 98.3% confidence interval (CI) and  $P < 0.017$  was the significance criterion when the 3 groups were compared. An outlier detection test was first performed on all variables of performance ( $\pm 1.5$  inter-quartile range rejection threshold). Effect sizes are reported using eta squared ( $\eta^2$ ). The effect size can be classified as small (0.01), medium (0.06) or large ( $> 0.14$ ). We assessed the effects of the group (RB, BFB + RB, CONTROL) on psychological variables (VAS-Stress, Thayer scores) using linear regression controlled for the scenario, the basal level, the level of neuroticism. Normality of residuals of the models were checked. Results are presented as estimate (standard error). For the multiple regression, the adjusted  $R^2$  was provided. No data was available to calculate a priori the sample size requested. Therefore, this pilot study included all the fifth-year anaesthesiology and critical care residents who participated in high-fidelity simulation at the Lyon medical simulation centre in 2019 in order to assess the interest



for a further study allowing a deeper exploration of the psychophysiological effects of these stress management techniques.

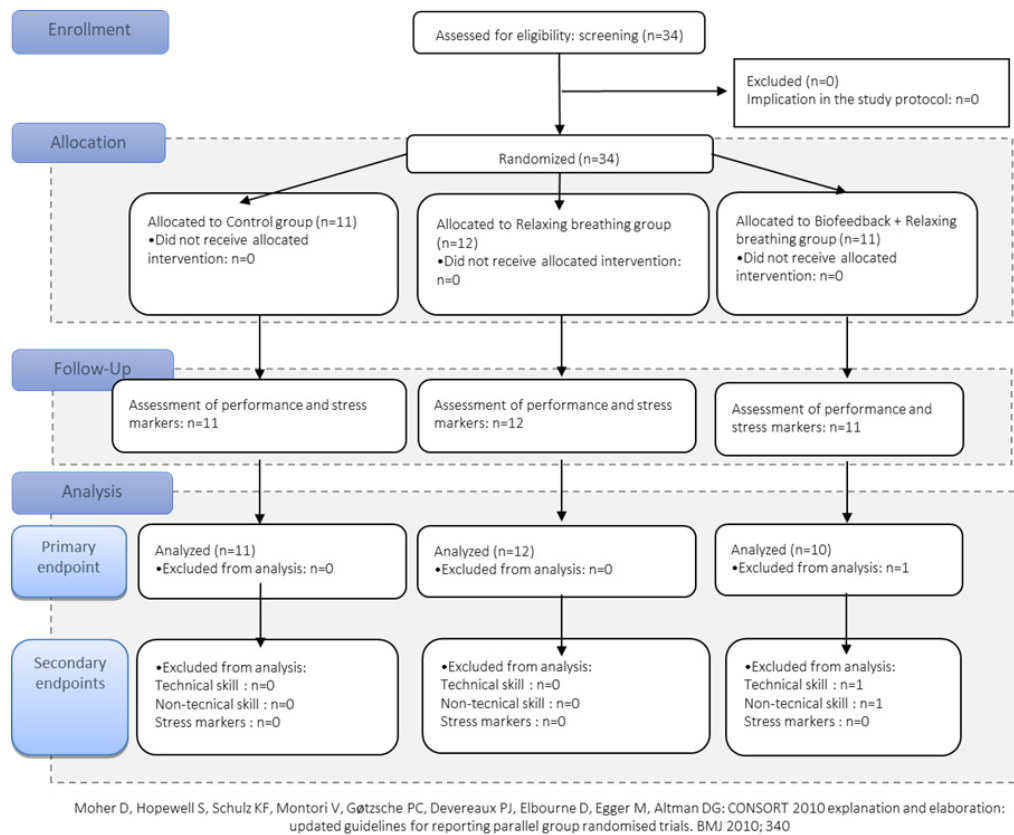


Figure 45. Study flowchart (étude 5)

### 3. Results

A total of 34 residents was included in this analysis. No resident declined to participate. Characteristics did not differ between groups (Tableau 4). Outlier detection led to the exclusion of one participant for the overall performance and the Ottawa GRS performance. For each performance score, means  $\pm$  SD are presented.

Tableau 4. Characteristics data of residents receiving CONTROL, RELAXING BREATHING (RB), OF RELAXING BREATHING WITH BIOFEEDBACK (RB + BFB) intervention. Values expressed as n or mean  $\pm$  SD.

	CONTROL n=11	RB n=12	RB + BFB n=11
Characteristic data			
Female, n	5	6	3
Age, years	29 $\pm$ 1	29 $\pm$ 1	29 $\pm$ 1
Previous simulation, n	7 $\pm$ 2	6 $\pm$ 2	7 $\pm$ 2

### 3.1. Primary endpoint

Overall performance was higher in the RB compared with the CONTROL group (Fig. 46, difference: 6.98 (98.3% CI [0.30 to 13.67],  $P = 0.013$ ). There was also a higher performance in the BFB + RB group compared with the CONTROL group (7.82 [0.82 to 14.81],  $P = 0.009$ ). No difference was observed between BFB + RB and RB groups (0.83 [-6.02 to 0.756],  $P = 0.756$ ). A main effect of scenario ( $P = 0.016$ ,  $\eta^2 = 0.21$ ) and a scenario  $\times$  group interaction ( $P = 0.045$ ,  $\eta^2 = 0.26$ ) were identified. However, no significant specific interactions remained after correcting for multi-testing.

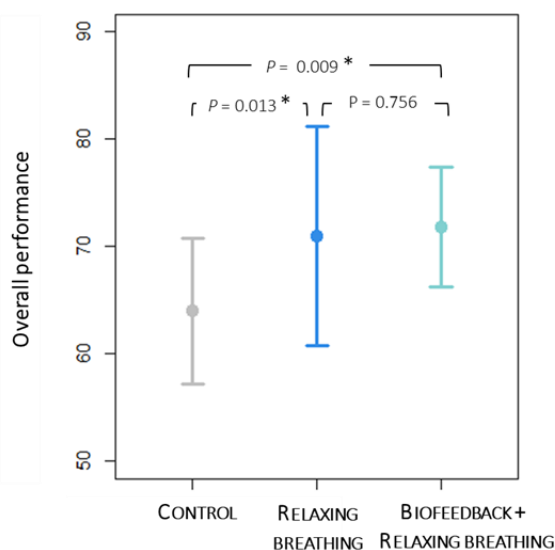


Figure 46. Group performance during high-fidelity simulation. Overall performance scores during scenarios of high-fidelity simulation. Points and arrows represent means and standards deviations. We assessed the treatment effect on the primary endpoint (overall performance) using linear regression model including main effects of group (RB, BFB + RB, CONTROL) and scenario, and assessing the group-by-scenario interaction.  $P < 0.017$  was the significance criterion when there were 3 groups being compared.

### 3.1. Secondary endpoints

#### 3.1.1. Performances

**Technical skills: Clinical specific performance.** The absolute interclass correlation coefficient for assessment of clinical specific performance was excellent (0.98, 95% CI: 0.96 to 0.99). RB have higher clinical specific performance than in the CONTROL group (10 [1.00 to 19.91],  $P = 0.009$ ). The BFB + RB had no difference of score with the CONTROL group (7 [-2.61 to 16.70],  $P = 0.073$ ). No difference between BFB + RB and RB groups' scores were found (-3.41 [-12.87 to 6.04],  $P = 0.361$ ). A significant effect of scenario ( $P < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.45$ ) was found.

**Non-technical skills: Ottawa scale performance.** The absolute interclass correlation coefficient for the assessments of Ottawa scale performance was good (0.67, 95% CI: 0.48 to 0.80). There was no group difference ( $P = 0.285$ ), no significant effect of scenario ( $P = 0.942$ ), and no scenario  $\times$  group interaction ( $P = 0.846$ ).

### 3.2.2. Stress level

The linear model of stress (adjusted  $R^2 = 0.22$ ) revealed that VAS-Stress scores in both interventional groups were lower than in the control group (Fig. 47, CONTROL vs RB,  $-2.02 \pm 0.89$ ,  $P = 0.029$ ) (CONTROL vs BFB + RB,  $-2.02 \pm 0.86$ ,  $P = 0.035$ ). The score did not differ when comparing both interventional groups (RB vs BFB + RB,  $P = 0.897$ ). The linear model of relaxation (adjusted  $R^2 = 0.41$ ) showed that both interventional groups reported higher scores than the control group (Fig. 47, CONTROL vs RB,  $2.80 \pm 1.09$ ,  $P = 0.017$ ; CONTROL vs BFB + RB,  $2.41 \pm 1.08$ ,  $P = 0.035$ ). The relaxation did not differ in both interventional groups ( $P = 0.709$ ). The linear model of tension ( $P = 0.025$ ,  $R^2 = 0.2751$ ) showed that values reported in the interventional groups did not differ from those reported in the control group (CONTROL vs RB,  $P = 0.275$  and CONTROL vs BFB + RB,  $P = 0.213$ ). The tension did not differ in both interventional groups ( $P = 0.875$ ). The linear model of activation (adjusted  $R^2 = -0.03$ ) revealed that interventional groups did not differ from the control group (CONTROL vs RB,  $P = 0.427$  and CONTROL vs BFB + RB,  $P = 0.632$ ). The activation did not differ in the two intervention groups ( $P = 0.183$ ). The linear model of deactivation (adjusted  $R^2 = 0.25$ ) showed no difference between groups (CONTROL vs RB,  $P = 0.521$ ) (CONTROL vs BFB + RB,  $P = 0.341$ ) (RB vs BFB + RB,  $P = 0.099$ ).

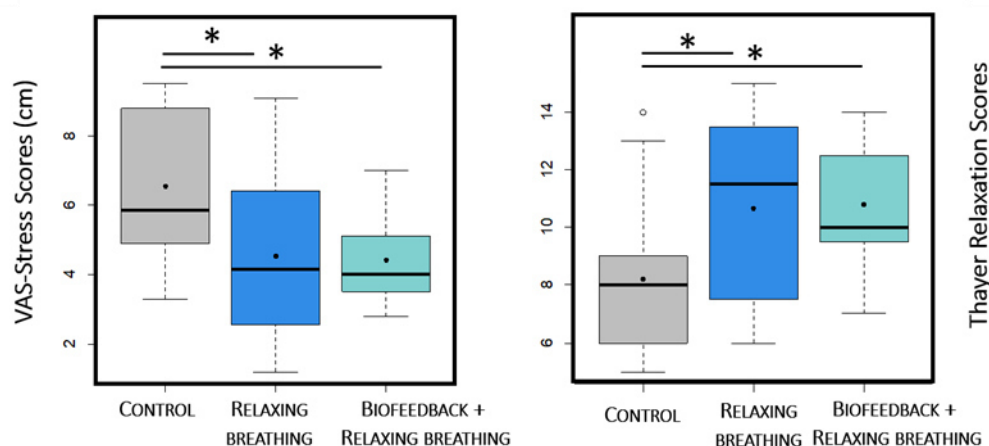


Figure 47. Psychological states after the intervention. Psychological stress after the intervention. VAS-Stress: Visual analogous scales for stress. The points indicate the means. The grey boxplots indicate the control group, the dark blue indicate the relaxing breathing group and the turquoise ones indicate the biofeedback + the relaxing breathing group.

## 4. Discussion

This pilot study firstly showed that an acute short session of relaxing breathing, alone or paired with cardiac biofeedback as stress management interventions improved the overall

performance of residents during simulation. Secondly, the results showed greater decrease of stress and increase in relaxation of participants in the two stress management intervention groups compared with the control group. Taken together, these results indicate that relaxing breathing, paired or not with biofeedback, might contribute to help residents to cope with the anticipation stress of simulated critical situations. Therefore, immediate simulation performance might benefit from the implementation of short proactive coping methods through mastery of physiological regulation processes based on standardized breathing. Further studies need to confirm the results observed here and to explore whether there is any improvement in real subsequent performance after application of stress management training.

The improvement of overall performance seems supported by the improvement in technical skills, notably following relaxing breathing. This improvement might have a positive impact on patient outcomes which is the ultimate objective in simulation. Technical skills correspond to explicit knowledge stored into short- and long-term memories, and higher executive functions such as flexibility and inhibitory control.<sup>33</sup> Executive functions are known to be affected by higher stress levels.<sup>4</sup> Previous findings in a laboratory acute stress context showed that relaxing breathing paired with biofeedback contributed to improve reaction time or/and accuracy of cognitive tasks relying on updating working memory, mental set shifting, and inhibition abilities.<sup>14,14bis</sup> The interventions could have helped with the preservation of these abilities resulting in higher technical performance

As opposed to technical performance, present results suggest that non-technical performance was not influenced by breathing interventions. Non-technical skills refer to resources that are now increasingly considered to complement technical skills, contribute to relevant and efficient task performance and to minimize adverse events during patient care.<sup>34,35</sup> Previous SMT studies, such as Tactics to Optimize Potential, reported positive impacts on non-technical skills performance.<sup>25,26</sup> In 2017, the tactics were acquired over five weeks and were specifically reactivated just before the scenario (e.g., mental dynamization followed by one minute of revitalizing breathing).<sup>25</sup> In contrast, the breathing exercise performed in the present study lasted 5 minutes and was relaxing. Therefore, the type of breathing should be further explored for its potential to produce different effects on both technical and non-technical skill performances during critical care simulations.

Previous studies reporting positive effects of stress management techniques on performance during simulation were based on protocols including frequent practice (from three days to five weeks), with an additional reactivation phase.<sup>25,36</sup> Long training including regular exercises presents important limits, as adherence and frequency of practice might be highly heterogeneous between individuals, and learning remains resource-intensive and time-consuming. Here, very short session (five-min) of relaxing breathing interventions demonstrated the favourable effects on performance and relaxation. The enhancement of performance might result from improvement of emotional regulation before and during the scenario.<sup>19</sup> Recent findings in a laboratory acute stress context showed that 15 minutes of relaxing breathing paired with biofeedback contributed to decreased psychophysiological anticipatory stress.<sup>9</sup> The present results support the hypothesis that shorter interventions might contribute to help residents to cope with the anticipated stress of critical situations. Further studies should explore these interventions during a clinical anticipatory stress. Frequent practice of breathing exercise might also help for dealing with general clinical anxiety.

The 5-min relaxing breathing exercise, paired or not with biofeedback, is quick, easy to use and applicable to many standard clinical situations without delaying care. After a prior short and standardized training, relaxing breathing can be performed before any expected critical situation resulting in anticipatory stress; e.g., waiting for a polytraumatized patient, facing a difficult situation in obstetrics, before the announcement of an unexpected complication to a family, before dealing with an expected difficult airway management. In fact, one can imagine the applicability of this SMT alone or collectively, when five minutes are available before delivering appropriate care. Furthermore, the experimentation of SMT in the curriculum of residents should increase the subsequent use in clinical practice. Still, it should be noticed that in most cases, the scenarios explored here involved crisis resources management for which in real life there is no time available to anticipate and carry out relaxation exercise. The effect and applicability of relaxing breathing to real clinical situations should be further explored.

The present study did not show any further improvement with the additional cardiac biofeedback<sup>13,11,12</sup>. Biofeedback was expected to improve adherence of the practitioner through awareness of the physiological effects. It is possible that biofeedback potentiation on relaxing breathing might be restricted to physiological components of stress. Additional

studies assessing both the physiological parameters and the long-term biofeedback practice, should help to clarify the putative additional effect of biofeedback.

This pilot study has some limitations. While reading biological test results have been extensively used in previous studies, this control condition might also generate extra cognitive load and/or generate an attentional bias.<sup>24–26</sup> A larger sample size might have allowed exploration of psychometric or experiential factors associated with effects of relaxing breathing and biofeedback. It might have allowed us to draw conclusions regarding the putative differential effect of interventions regarding the scenario and prevent from the gender inequality between the groups. As the simulation sessions were long and the order of scenarios was not randomized, fatigue could be a potential cause of the scenario-intervention interaction identified. Therefore, influence of fatigue on effectiveness of SMT should be further explored. Second, no assessment of baseline clinical performance was performed before simulation. However, the homogeneity of training undertaken by the end of a residency at the same university hospital, associated with randomization should have reduced this potential bias. Third, the effect observed in subjective psychological data remains small. Stress level could have been measured with multisource analyses, including biological samples, to extensively explore the impact of interventions on stress levels. Finally, no assessment of training in daily stress coping practices was collected. Further studies should also consider individual knowledge, regular practice of stress coping techniques (e.g., yoga, meditation) and assess whether residents used additional techniques during the simulation. One might suspect that experimentation of stress management techniques during the curriculum of residents should initiate their subsequent use in clinical practice. Assessing the delaying effects of these short breathing interventions on both the future spontaneous use of SMT and long-term memory of educational messages is shall be further explored of main interest.

## **5. Conclusion**

Performing a proactive 5-min period of stress management with relaxing breathing alone (+7%) or paired with biofeedback (+8%) lead to an increase in overall performance during high-fidelity simulation. The higher global performance seemed to result from an increase in technical skills. This study provides evidence for the benefit of an acute short intervention of breathing paired or not with cardiac biofeedback on stress reduction and relaxation

improvement prior to simulation of critical situations. Visualizing cardiac biofeedback did not seem to add a benefit in this setting.

#### References

1. Isbell LM, Boudreaux ED, Chimowitz H, Liu G, Cyr E, Kimball E. What do emergency department physicians and nurses feel? A qualitative study of emotions, triggers, regulation strategies, and effects on patient care. *BMJ Qual Saf* 2019;0:1–11.
2. Harvey A, Bandiera G, Nathens AB, LeBlanc VR. Impact of stress on resident performance in simulated trauma scenarios. *J Trauma Acute Care Surg* 2012;72:497–503.
3. Krage R, Zwaan L, Tjon Soei Len L, Kolenbrander MW, Groenigen Di Van, Loer SA, Wagner C, Schober P. Relationship between non-technical skills and technical performance during cardiopulmonary resuscitation: Does stress have an influence? *Emerg Med J* 2017;34:728–33.
4. Leblanc VR. The Effects of Acute Stress on Performance: Implications for Health Professions Education. *Acad Med* 2009;84:25–33.
5. Hawryluck L, Brindley PG. Psychological burnout and critical care medicine: big threat, big opportunity. *Intensive Care Med* 2018;44:2239–41. <https://doi.org/10.1007/s00134-018-5063-6>.
6. Stillwell SB, Vermeesch AL, Scott JG. Interventions to Reduce Perceived Stress Among Graduate Students: A Systematic Review With Implications for Evidence-Based Practice. *Worldviews Evidence-Based Nurs* 2017;14:507–13.
7. Regehr C, Glancy D, Pitts A. Interventions to reduce stress in university students: A review and meta-analysis. *J Affect Disord* 2013;148:1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jad.2012.11.026>.
8. Jones JW, Barge BN, Steffy BD, Fay LM, Kunz LK, Wuebker LJ. Stress and Medical Malpractice: Organizational Risk Assessment and Intervention. *J Appl Psychol* 1988;73:727–35.
9. Schlatter S, Schmidt L, Lilot M, Guillot A, Debarnot U. Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress. *Behav Res Ther* 2021;3:103834.
10. VanDiest I, Verstappen K, Aubert AE, Widjaja D, Vansteenwegen D, Vlemincx E. Inhalation/Exhalation Ratio Modulates the Effect of Slow Breathing on Heart Rate Variability and Relaxation. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2014;39:171–80.
11. Subhani AR, Kamel N, Saad MNM, Nandagopal N, Kang K, Malik AS. Mitigation of stress: new treatment alternatives. *Cogn Neurodyn* 2018;12:1–20. <https://doi.org/10.1007/s11571-017-9460-2>.
12. DeWitte N, Buyck I, Daele T Van. Combining Biofeedback with Stress Management Interventions: A Systematic Review of Physiological and Psychological Effects. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2019;0:0. <http://dx.doi.org/10.1007/s10484-018-09427-7>.
13. Goessl VC, Curtiss JE, Hofmann SG. The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety : a meta-analysis. *Psychol Med* 2017;47:2578–86.
14. Prinsloo GE, Rauch HGL, Lambert MI, Muench F, Noakes TD, Derman WE. The effect of short duration heart rate variability (HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Appl Cogn Psychol* 2011;25:792–801.
- 14 bis. Schlatter S, Guillot A, Schmidt L, Mura M, Trama R, DiRienzo F, Lilot M, Debarnot U. Combining Proactive Transcranial Stimulation and Cardiac Biofeedback to Substantially Manage Harmful Stress Effects. *Brain Stimulation*, 14, 1348–1392, 2021 [doi.org/10.1016/j.brs.2021.08.019](https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.08.019)
15. Goldberg MB, Maher Z, Fish JH, Milner R, Yu D, Martin ND, Goldberg AJ. Optimizing Performance Through Stress Training: An Educational Strategy for Surgical Residents. *J Am Coll Surg* 2014;219:S119.
16. Motola I, Devine LA, Chung HS, Sullivan JE, Issenberg SB. Simulation in healthcare education: A best evidence practical guide. *AMEE Guide No. 82. Med Teach* 2013;35:142–59.
17. Gaba DM. Crisis resource management and teamwork training in anaesthesia. *Br J Anaesth* 2010;105:3–6.
18. Krage R, Tjon Soei Len L, Schober P, Kolenbrander M, Groenigen D Van, Loer SA, Wagner C, Zwaan L. Does individual experience affect performance during cardiopulmonary resuscitation with additional external distractors? *Anaesthesia* 2014;69:983–9.
19. Leblanc VR, Regehr C, Tavares W, Scott AK, MacDonald R, King K. The impact of stress on paramedic performance during simulated critical events. *Prehosp Disaster Med* 2012;27:369–74.
20. Moher D, Hopewell S, Schulz KF, Montori V, Gøtzsche PC, Devereaux PJ, Elbourne D, Egger M, Altman DG. CONSORT 2010 explanation and elaboration: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials. *BMJ* 2010;340.
21. Rudolph JW, Raemer DB, Simon R. Establishing a safe container for learning in simulation the role of the presimulation briefing. *Simul Healthc* 2014;9:339–49.
22. Zigmont JJ, Kappus LJ, Sudikoff SN. The 3D Model of Debriefing: Defusing, Discovering, and Deepening. *Semin Perinatol* 2011;35:52–8. <http://dx.doi.org/10.1053/j.semperi.2011.01.003>.
23. Sawyer T, Eppich W, Brett-Fleegler M, Grant V, Cheng A. More Than One Way to Debrief: A Critical Review of Healthcare Simulation Debriefing Methods. *Simul Healthc* 2016;11:209–17.
24. Evain JN, Zoric L, Mattatia L, Picard O, Ripart J, Cuvillon P. Residual anxiety after high fidelity simulation in anaesthesiology: An observational, prospective, pilot study. *Anaesth Crit Care Pain Med* 2017;36:205–12.

25. Sigwalt F, Petit G, Evain J-N, Claverie D, Bui M, Guinet-Lebreton A, Trousselard M, Canini F, Chassard D, Duclos A, Lehot J-J, Rimmelé T, Lilot M. Stress Management Training Improves Overall Performance during Critical Simulated Situations. *Anesthesiology* 2020;1–14.
26. Evain JN, Perrot A, Vincent A, Cejka JC, Bauer C, Duclos A, Rimmelé T, Lehot J-J, Lilot M. Team planning discussion and clinical performance: a prospective, randomised, controlled simulation trial. *Anaesthesia* 2019;74:488–96.
27. Kim J, Neilipovitz D, Cardinal P, Chiu M, Clinch J. A pilot study using high-fidelity simulation to formally evaluate performance in the resuscitation of critically ill patients: The University of Ottawa Critical Care Medicine, High-Fidelity Simulation, and Crisis Resource Management I Study. *Crit Care Med* 2006;34:2167–74.
28. Williams VSL, Morlock RJ, Feltner D. Psychometric evaluation of a visual analog scale for the assessment of anxiety. *Health Qual Life Outcomes* 2010;8:1–8.
29. Thayer RE. Factor analytic and reliability studies on the activation-deactivation adjective check list. *Psychol Rep* 1978;42:747–56.
30. Plaisant O, Courtois R, Réveillère C, Mendelsohn GA, John OP. Validation par analyse factorielle du Big Five Inventory français (BFI-Fr). Analyse convergente avec le NEO-PI-R. *Ann Med Psychol (Paris)* 2010;168:97–106.
31. Schneider TR. The role of neuroticism on psychological and physiological stress responses. *J Exp Soc Psychol* 2004;40:795–804.
32. Cichetti, Domevic V. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychol Assess* 1994;6:284–90.
33. Cristofori I, Cohen-Zimmerman S, Grafman J. Executive functions. In: *Handbook of Clinical Neurology*. Vol 163., 2019:197–219.
34. Flin R, Paul O, Crichton M. *Safety at the sharp end: a guide to non-technical skills*. Crichton. (Ashgate, ed.). Aldershot, UK, 2008.
35. Kohn L, Corrigan J, Donaldson M. *To err is human: building a safer Health system*. ((US) NAP, ed.). Washington (DC), 2000.
36. Bouchard S, Bernier F, Boivin É, Morin B, Robillard G. Using biofeedback while immersed in a stressful videogame increases the effectiveness of stress management skills in soldiers. *PLoS One* 2012;7.
37. Plans D, Morelli D, Sütterlin S, Ollis L, Derbyshire G, Cropley M. Use of a biofeedback breathing app to augment poststress physiological recovery: Randomized pilot study. *J Med Internet Res* 2019;21:1–8.

### 2.2.3.3. Conclusion

Cette étude cherchait à évaluer l’impact de 5 minutes de respiration relaxante préventive, avec ou sans VFC-RETRO, réalisés pendant l’anticipation d’une prise en charge d’une situation clinique critique stressante sur le niveau de stress psychologique et les performances techniques et non techniques d’internes d’anesthésistes réanimation. Nous avons comparé les effets de 5 minutes de respiration relaxante, seule ou couplée à un VFC-RETRO, comparativement à une condition contrôle (lecture d’examen biologique) avant la prise en charge d’une situation clinique critique simulée.



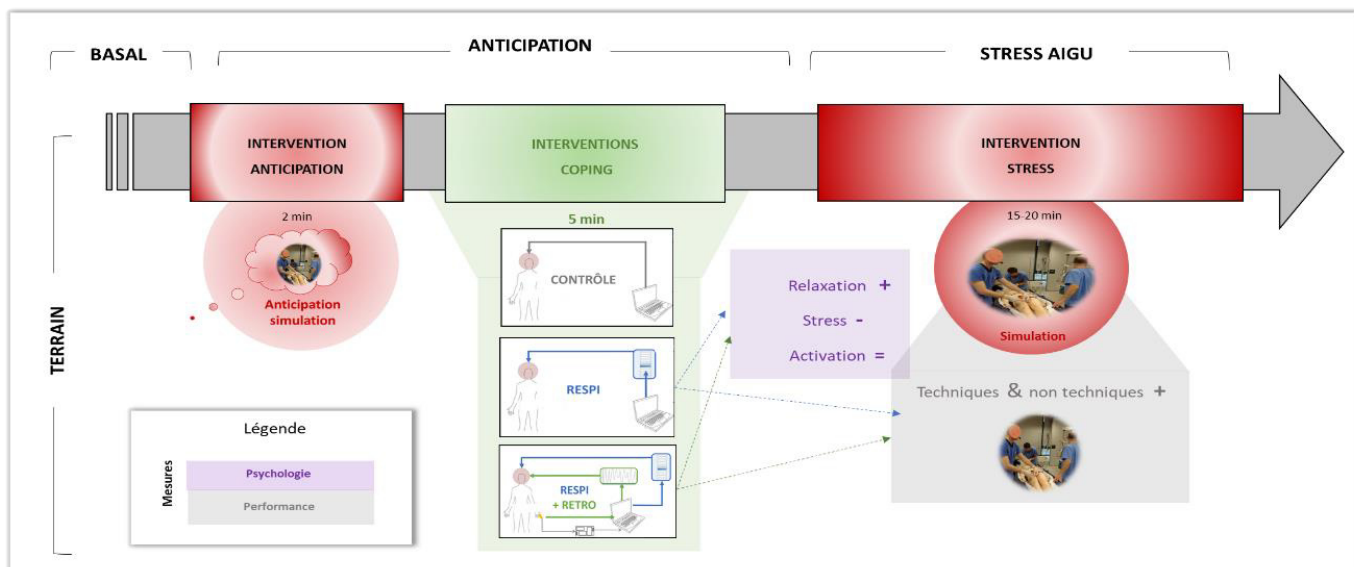


Figure 48. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 5. L'anticipation correspond à la période de briefing : c'est le moment où les professionnels de santé sont informés du cas clinique qu'ils devront prendre en charge. Les fonctions exécutives ont été évaluées objectivement (performances techniques et non techniques). Comparativement à la condition contrôle, les deux groupes expérimentaux ont les performances augmentées. La respiration seule ou combiné au VFC-RETRO a permis de diminuer les marqueurs psychologiques du stress (VAS stress) et d'augmenter la relaxation.

Cette étude a montré que la respiration relaxante, seule ou associée à un VFC-RETRO, diminuait le stress psychologique et augmentait le sentiment de relaxation durant l'anticipation d'une prise en charge clinique difficile (Fig. 48). Ces données valident, pour la première fois, l'efficacité de ces techniques lors d'une application très courte, que les professionnels de santé pourraient facilement implémenter dans l'exercice de leurs fonctions. Alors que Wells et collaborateurs (2012) affirmaient qu'un exercice de respiration diminuait le stress subjectif chez les individus présentant des traits d'anxiété élevés (Wells et al., 2012), nos résultats tendent vers une généralisation de ces effets. En effet, l'ensemble des individus testés ont bénéficié de ces techniques. Finalement nos résultats ne dévoilent pas de bénéfices supplémentaires du VFC-RETRO comparativement à la respiration seule, en accord avec l'étude de Wells et al. (2012). Nos résultats ont également montré que comparativement au groupe contrôle, les internes des deux groupes interventionnels amélioraient leur performance clinique globale. Des analyses plus approfondies ont permis de déterminer que cette amélioration portait spécifiquement sur les performances techniques. Finalement, cette étude a également montré que les deux types d'intervention permettaient d'augmenter le sentiment de relaxation sans toutefois modifier les niveaux d'activation et d'énergie perçus. La création d'un état conscient et détendu, tout en restant activé, semble optimale durant des situations stressantes où un haut niveau de performance est attendu. En effet un niveau

d'activation élevé couplé avec un stress bas semble souvent constituer une combinaison optimale pour être performant (Fig. 49) (Delignières, 1993).

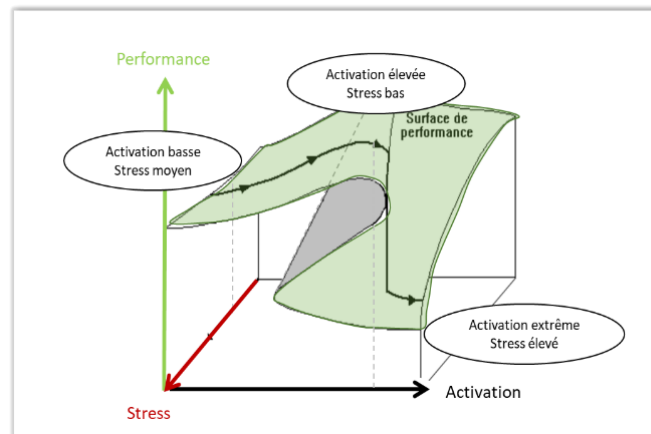


Figure 49. Influence du niveau de stress et du niveau d'activation sur la performance. La combinaison permettant d'atteindre une performance optimale est un niveau d'activation élevé et d'un stress bas. Figure adaptée de Delignières (1993) dans *Anxiété et performance*. Figure elle-même adaptée de « *Influence du niveau d'anxiété cognitive sur la relation activation/performance* » d'après Hardy & Fazey (1987), cités par Jones et Hardy (1989).

Pour conclure, les résultats de cette étude ont permis de démontrer la faisabilité d'implémenter la respiration et le VFC-RETRO, et souligne l'utilité de ces deux approches pour diminuer le stress et améliorer les performances. Toutefois, elle reste une étude préliminaire réalisée sur 34 individus et n'a exploré que la facette psychologique du stress. Ainsi, l'approfondissement de ces résultats, notamment par le biais d'une caractérisation des effets physiologiques des interventions de coping, reste nécessaire.

## 2.2.4. Etude 6 : Impact de la respiration relaxante et du rétrocontrôle visuel sur le stress et les performances techniques en situation écologique

### 2.2.4.1. Introduction

Notre étude pilote suggère que les interventions de gestion du stress sont utiles pour améliorer les performances cliniques des professionnels de santé pendant un évènement stressant (étude 5). Des analyses plus approfondies ont permis de montrer que cette amélioration était le reflet d'une augmentation des performances techniques. Les deux interventions de gestion émotionnelle (respiration relaxante seule ou associée au VFC-RETRO) ont permis une amélioration similaire des marqueurs subjectifs du stress et des performances cliniques. Cependant, seuls les bienfaits psychologiques ont été évalués, alors que la littérature montre que le VFC-RETRO modifie également de nombreux paramètres physiologiques (Berry et al., 2014; DeWitte et al., 2019; Gevirtz, 2013; Goessl et al., 2017a). Il est alors possible que les bienfaits additionnels du VFC-RETRO soient observables uniquement au niveau physiologique avec, par exemple, une amélioration de la VFC ou bien une diminution de la réactivité cardiaque. La diminution des marqueurs physiologiques du stress, permettrait de prévenir des maladies physiologiques associées au stress (e.g. maladies cardiovasculaires).

Ainsi, le but de cette étude était d'approfondir la caractérisation des effets de ces deux techniques de gestion émotionnelle dans un contexte de stress professionnel. Les interventions préventives ont été effectuées juste avant la prise en charge d'une situation clinique critique stressante. Pendant l'anticipation, le niveau de stress a été caractérisé par des marqueurs psychologique (AD-ACL relaxation/activation) et physiologique (score de cohérence cardiaque). Les effets sur les différents marqueurs de la VFC ont également été caractérisés tout du long de la séance de simulation (SDRR, LF/HF). Dans un second temps, cette étude cherchait à caractériser spécifiquement l'impact de ces interventions sur les performances objectives (performance technique) et subjectives des internes (EVA performance) (Annexe 10).

### 2.2.4.2. Matériel et méthode

**Participants.** 147 internes en anesthésie réanimation âgés de 23 à 37 ans (42 femmes, 27 ± 3 ans) ont participé à l'expérience. Les participants ont été répartis aléatoirement dans 3 groupes, en fonction de la nature de l'intervention de coping : contrôle (CTRL, n = 50),

respiration relaxante (RESPI, n = 48), respiration relaxante + VFC-RETRO (RESPI + VFC-RETRO, n = 49). Les participants ont reçu une note d'informations détaillée et ont signé un formulaire de consentement. La simulation haute-fidélité a été divisée en 4 grandes étapes : briefing du scénario, intervention de coping de 5 minutes, scénario de simulation, débriefing.

**Mesures du stress.** Avant et après les 5 minutes d'intervention, chaque interne a rempli le questionnaire AD-ACL afin de définir les ratios de relaxation et d'activation. Durant les interventions, les participants étaient équipés d'un capteur de pouls auriculaire enregistrant l'activité cardiaque (370 Hertz, HeartMath technologies, Add Heart®) et permettant le calcul d'un score de cohérence cardiaque ( $Pwr\ pic/[Pwr\ total - Pwr\ pic]$ ). Pour chaque interne, l'activité cardiaque a également été enregistrée à l'aide d'une veste connectée (Hexoskin™, Carre Technologies Inc, Montréal, Québec, Canada). Ce recueil de données a permis d'extraire des paramètres de VFC à posteriori. L'analyse a été réalisée par segments de 5 minutes et pendant quatre périodes de temps (BASAL, INTERVENTION, SCENARIO, RECUPERATION). La détection des artefacts et l'extraction des données temporelles et fréquentielles ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB (R2019a®). Pour le domaine temporel, nous avons calculé l'écart-type des intervalles R-R (SDRR, en ms). Pour le domaine fréquentiel, nous avons quantifié la puissance des basses fréquences (LF : 0,04-0,15 Hz) et des hautes fréquences (HF : 0,15-0,4 Hz), puis le rapport LF/HF a été calculé.

**Evaluation de la performance.** La performance technique objective a été évaluée par deux investigateurs aveugles à la randomisation. Pour chaque scénario de simulation, ils ont utilisé une liste de points spécifiques (total de 100 points). Chaque item (e.g., l'interne a demandé le fibroscope) était associé à un nombre de points (réalisation spontanée : 3 points, réalisation facilitée : 2, absence de réalisation : 0).

Au terme de la simulation, les internes devaient évaluer sur une EVA comment l'intervention a influencé leurs performances cliniques (de 0 « négativement » à 10 « positivement »).

**Analyse statistique.** Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R studio (version 3.6.3 R, Foundation, Vienne, Autriche). Les effets des interventions sur les variables psychologiques du stress (AC-ACL relaxation/activation) ont été comparés en utilisant une analyse linéaire avec un intercept aléatoire par sujet. Le TEMPS (POST-BRIEFING, POST-INTERVENTION) et le GROUPE (CTRL, RESPI, RESPI + VFC-RETRO) ont été considérés comme des effets

fixes. Les scores de cohérence cardiaque ont été comparés à l'aide d'une analyse de variance avec le facteur GROUPE. Les effets des interventions sur les variables physiologiques du stress (SDRR et LF/HF) ont été comparés en utilisant une analyse linéaire avec un intercept aléatoire par sujet. Le TEMPS (BASAL, INTERVENTION, SCENARIO, DEBRIEFING) et le GROUPE ont été considérés comme des effets fixes. La performance technique a été comparée à l'aide d'une analyse de variance avec les facteurs GROUPE et SCENARIO. La performance subjective (EVA performance) a été comparée à l'aide d'une analyse de variance avec le facteur GROUPE. Tous les tests étaient bilatéraux et une valeur de  $p < 0.05$  a été considérée comme statistiquement significative. Tous les modèles ont été corrigés pour les comparaisons multiples (correction de Bonferroni).

#### 2.2.4.3. Résultats préliminaires

**Marqueurs du stress pendant la période d'anticipation.** Le modèle a révélé une interaction significative GROUPE x TEMPS sur le ratio de relaxation AD-ACL ( $\chi^2(2) = 8,79$ ,  $p=0,012$ ,  $Rp^2 = 0,01$ ), montrant une augmentation du niveau de relaxation plus élevée dans le groupe RESPI + VFC-RETRO que dans le groupe CTRL ( $0,39 \pm 0,13$ ,  $p=0,011$ ). Le modèle sur le ratio d'activation AD-ACL n'a pas montré d'interaction significative GROUPE x TEMPS ( $\chi^2(2) = 2.93$ ,  $p=0.231$ ). L'ANOVA portant sur le score de cohérence cardiaque a révélé un effet principal du GROUPE ( $F_{2,135}=84.15$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.56$ ). L'analyse post-hoc a permis de déterminer que les deux interventions de coping ont été efficaces pour améliorer la cohérence cardiaque pendant l'intervention. Les scores étaient significativement plus élevés dans le groupe RESPI (différence 112 [82:142],  $p < 0.001$ ) et dans le groupe RESPI + VFC-RETRO (différence 153 [123:182],  $p < 0.001$ ) que dans le groupe CTRL. Les scores étaient également plus élevés dans le groupe RESPI + VFC-RETRO que dans le groupe RESPI (41[12:70],  $p= 0.003$ ) (Fig. 50).

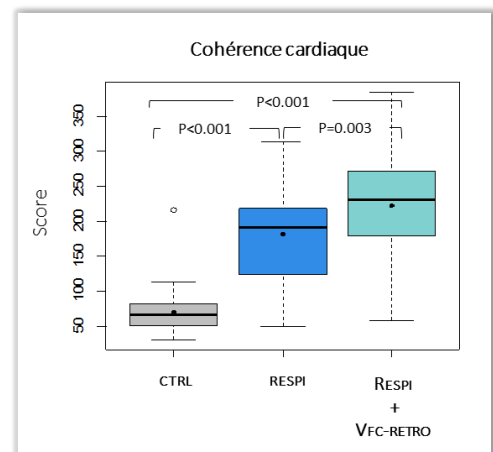


Figure 50. Score de cohérence cardiaque en fonction des interventions.

**Marqueurs du stress pendant la simulation.** L'analyse des paramètres de la VFC a révélé des interactions GROUPE x TEMPS significatives pour la SDRR ( $\chi^2(6) = 51,93$ ,  $p < 0.0001$ ,  $Rp^2=0,05$ ) et le ratio LF/HF ( $\chi^2(6) = 135.129$ ,  $p < 0.0001$ ,  $Rp^2=0.12$ ) (Tableau 5).

Tableau 5. Interactions GROUPE x TEMPS pour les mesures physiologiques du stress. Les valeurs sont représentées par la différence estimée  $\pm$  erreur standard (ES). Les comparaisons post-hoc significatives sont représentées en gras.

		SDRR			LH/HF		
		Différence estimée	ES	<i>P</i>	Différence estimée	ES	<i>P</i>
BASAL	CTRL vs RESPI	-19.94	5.09	<b>0.001</b>	-0.445	0.065	<b>&lt;.001</b>
	vs CTRL vs RESPI + VFC	-23.88	5.09	<b>&lt;.001</b>	-0.646	0.065	<b>&lt;.001</b>
INTERVENTION	RESPI vs RESPI + VFC	-3.94	5.08	1.000	-0.201	0.065	<b>0.024</b>
INTERVENTION	CTRL vs RESPI	-24.83	5.13	<b>&lt;.001</b>	-0.454	0.065	<b>&lt;.001</b>
	vs CTRL vs RESPI + VFC	-32.45	5.09	<b>&lt;.001</b>	-0.524	0.065	<b>&lt;.001</b>
SCENARIO	RESPI vs RESPI + VFC	-7.62	5.08	1.000	-0.070	0.065	1.000
SCENARIO	CTRL vs RESPI	5.95	5.13	1.000	0.113	0.064	0.538
	vs CTRL vs RESPI + VFC	1.53	5.09	1.000	-0.037	0.064	1.000
RECUPERATION	RESPI vs RESPI + VFC	4.90	5.08	1.000	-0.151	0.064	0.183

**Performance technique objective.** Pour les mesures de performance technique objective, aucun effet GROUPE ( $F_{2,125}=1.86$ ,  $p=0.160$ ) n'a été observé, mais il apparaît un effet significatif du SCÉNARIO ( $F_{19,125}=4228.9$ ,  $p<0.0001$ ,  $\eta^2=0.40$ ).

**Performance subjective.** Les données auto-évaluées ont révélé un effet principal du GROUPE ( $F_{2,144}=7.26$ ,  $p<0.0001$ ,  $\eta^2=0.09$ ) sur les EVA performance. Les internes ayant intégré les deux groupes d'interventions de gestion du stress ont jugé que les outils employés les avaient aidés à être plus performants ; les scores EVA performance étaient donc plus élevés dans le groupe RESPI (1.42 [0.40 : 2.45],  $p=0.003$ ) et dans le groupe RESPI + VFC-RETRO (1.36 [0.34:2.38],  $p=0.005$ ) que dans le groupe CTRL.

#### 2.2.4.4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer l'impact de techniques préventives de gestion émotionnelle sur les niveaux de stress psychophysologique et sur les performances techniques d'anesthésistes réanimateurs. Nous avons comparé les effets de 5 minutes de respiration relaxante seule et de respiration relaxante couplée à la VFC-RETRO à une condition contrôle (lecture d'examen biologique), juste avant la prise en charge d'une situation critique.

Les résultats de cette étude ont souligné l'avantage de la respiration associée au VFC-RETRO par rapport à la respiration seule, durant la période d'anticipation d'un événement stressant (Fig. 51). Les bénéfices du VFC-RETRO ont été observés sur les marqueurs psychologiques (augmentation de la relaxation) et physiologiques (cohérence cardiaque et ratio LF/HF). À notre connaissance, une seule étude avait comparé les effets d'un exercice de respiration standardisée à celui d'un exercice de respiration couplée à un VFC-RETRO (Wells et al., 2012). Nos résultats ne confirment pas ces données qui ne montraient pas d'avantage

du VFC-RETRO dans un contexte de stress professionnel. Nos observations de terrains ont, au contraire, permis de voir que le VFC-RETRO facilitait l'adhésion et la concentration à l'exercice. Les résidents souhaitent se confronter rapidement à la situation clinique, ainsi un exercice de relaxation sans objectif risque d'être perçu comme étant décontextualisé, voire inadéquat. Suivre un curseur respiratoire est relativement monotone et ne présente pas de challenge, alors que l'intervention de VFC-RETRO présente une interface sensible et changeante, avec un objectif clair et stipulé (essayer d'obtenir le score de cohérence cardiaque le plus élevé possible). Nous postulons que ces caractéristiques sont de nature à faciliter l'adhésion à l'intervention et ainsi à en potentialiser les effets.

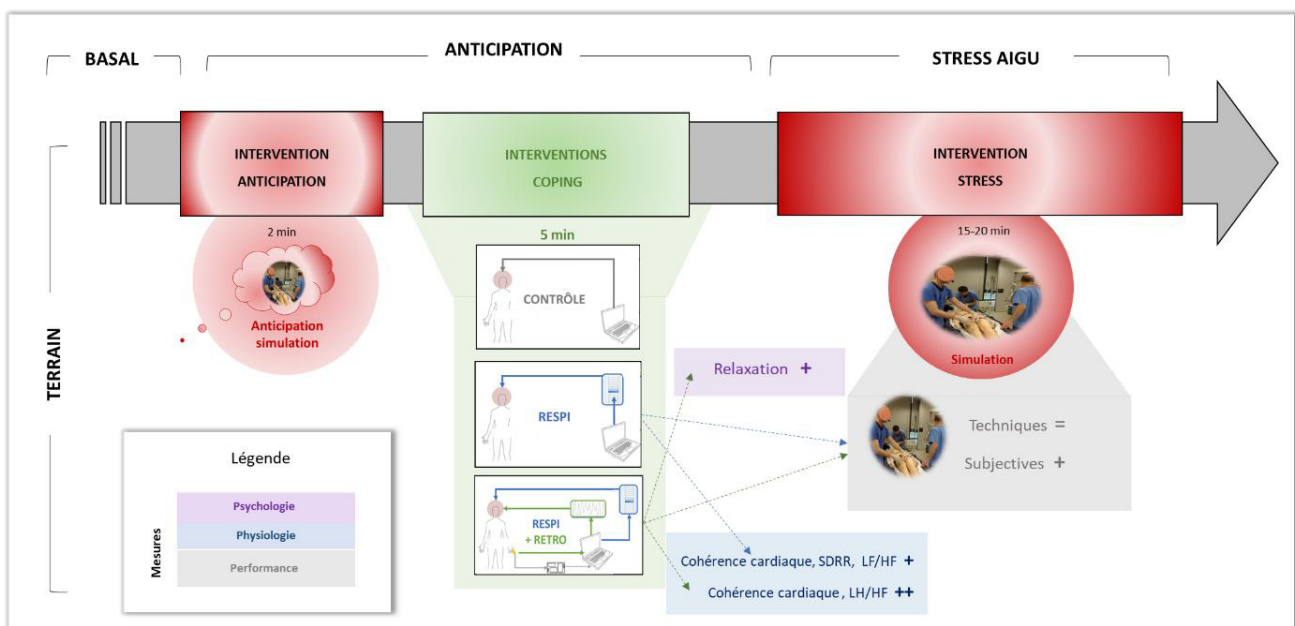


Figure 51. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 6. L'anticipation simulation correspond à la période de briefing : c'est le moment où les professionnels de santé sont informés du cas clinique qu'ils devront prendre en charge. Les performances sur les fonctions exécutives ont été évaluées subjectivement (VAS performances) et objectivement (performances techniques). La respiration seule ou combinée au VFC-RETRO a permis de diminuer les marqueurs physiologiques du stress (cohérence cardiaque, SDRR, LH/LF). Le VFC-RETRO a permis de potentialiser les effets de la respiration, avec une amélioration psychologique (relaxation) et physiologique (cohérence cardiaque). Comparativement à la condition contrôle, les deux groupes interventionnels ont vu leur performance subjective augmenter, même si cette amélioration n'a pas été objectivée (performances techniques).

Les bienfaits des interventions ne se limitent pas à la diminution des marqueurs du stress. En effet, les internes ont également jugé que les interventions de gestion du stress les ont aidés à être plus performants. Toutefois, les données objectives n'attestent pas cette amélioration. Il est possible que nos groupes interventionnels aient été constitués d'individus ayant un niveau de compétences initiales légèrement inférieur à ceux du groupe contrôle. Afin de trancher sur l'impact objectif de ces interventions sur les performances cliniques, il

convient dorénavant de mettre en place un protocole de simulation en test-re-test permettant de comparer les modifications des niveaux intra-individuels de performance.

Pour conclure, les résultats présentés au long de ces études montrent des effets bénéfiques de l'implémentation des techniques de gestions émotionnelles à l'échelle du groupe (études 3, 4, 5, 6). Ces résultats encourageants permettent d'envisager la mise en place de techniques de remédiation du stress à grande échelle. Cependant, les réponses de stress font l'objet de variabilités interindividuelles considérables (Williams et al., 2010). Il est donc probable qu'au sein d'un groupe, certains individus n'aient pas été stressés, n'aient pas adhéré à la technique et/ou peu tiré de bénéfices des différentes interventions. L'identification, au préalable, des facteurs individuels de sensibilité au stress reste ainsi essentielle afin de spécifier les besoins.

## 2.2.5. Etude 7 : Etudes des sensibilités individuelles

### 2.2.5.1. Introduction

Afin d'identifier les personnes les plus sensibles et de proposer des techniques de remédiations efficaces, il est important de considérer des facteurs individuels de sensibilité. La sensibilité au stress désigne la prédisposition de certains individus à avoir une réponse psychophysiologique particulièrement forte en réponse à des stimuli stressants, comme une fréquence cardiaque plus élevée et/ou un ressenti émotionnel particulièrement négatif. Ces facteurs de sensibilité peuvent se manifester par des marqueurs psychométriques stables tels qu'un haut niveau d'anxiété ou de névrosisme. Il est attendu que la personnalité interagisse avec toutes les étapes du stress : exposition, réactivité, récupération et rétablissement (Williams et al., 2010). La personnalité a donc été proposée comme un facteur prédictif important de la réponse au stress (Soliemanifar et al., 2018). Le modèle des cinq facteurs (FFM), qui caractérisent la personnalité en cinq traits (névrosisme, extraversion, agréabilité, conscienciosité, ouverture aux expériences), a été largement utilisé (Digman, 1990).

Lors d'un événement stressant, les individus ayant un score élevé d'agréabilité et de conscienciosité ont des réactions physiologiques plus élevées que ceux présentant des scores faibles (Bibbey et al., 2013; Garcia-Banda et al., 2011). Au contraire, l'ouverture et l'extraversion prédisent une plus grande résilience (Jonassaint et al., 2009; Kirschbaum et al.,



1995; Ó Súilleabháin et al., 2018; Williams et al., 2009; Xin et al., 2017). La relation entre névrosisme et réactivité physiologique au stress reste cependant assez mitigée (Bibbey et al., 2013; Schneider, 2004; Schneider et al., 2012; Xin et al., 2017). Alors que des hauts traits en névrosisme prédisent une plus grande sensibilité émotionnelle au stress (événement perçu comme plus stressant, menaçant, négatif), ces derniers prédisent une réactivité physiologique basse. Malgré une littérature abondante sur les interactions entre stress et personnalité, il est étonnant de constater que l'impact de la personnalité des anesthésistes réanimateurs sur la sensibilité au stress professionnel reste à ce jour que très peu explorée (Van Der Wal et al., 2018, 2016).

La personnalité peut également expliquer les stratégies individuelles d'adaptation au stress, c'est-à-dire les efforts cognitifs et comportementaux visant à prévenir, gérer ou atténuer le stress (Lazarus et Folkman, 1984). Des études précédentes ont montré que la personnalité influence l'efficacité de diverses méthodes de coping (Nyklíček et Irmischer, 2017; Pardine et Napoli, 1977; Peciulienė et al., 2015; Peña-Gómez et al., 2011; Zohar et al., 2013)<sup>46</sup>. Par exemple, quatre séances de rétrocontrôle biologique basées sur la fréquence cardiaque ont été associées à une augmentation plus importante de la conductance cutanée chez les personnes ayant des scores d'ouverture, d'agréabilité et de conscienciosité élevés (Peciulienė et al., 2015). Cependant, l'impact de la personnalité sur l'efficacité du VFC-RETRO et de la respiration reste à déterminer.

La présente étude a exploré l'impact de la personnalité sur le stress d'anticipation chez les internes en anesthésie et réanimation. Cette étude avait pour but de déterminer les dimensions de la personnalité influençant le stress d'anticipation psychophysiologique et d'évaluer l'impact des différents traits de la personnalité sur l'efficacité des techniques de gestion émotionnelle. Cette étude est ancillaire à l'étude 6 (même échantillon d'individus). Chaque résident a été exposé à l'anticipation d'un événement de soins critiques simulés. Avant le scénario stressant, les internes ont été répartis dans 3 groupes : groupe contrôle et deux groupes interventionnels (respiration relaxante seule ou combinée au VFC-RETRO). Les traits de personnalité (névrosisme, conscienciosité, agréabilité, extraversion, ouverture) ont été évalués à l'aide de l'inventaire des *Big Five* (Plaisant et al., 2010). L'anxiété

---

<sup>46</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : modérateurs individuels du stress : traits psychologiques.

psychophysiologique d'anticipation a été évaluée avec le *STAI-E* et la réactivité cardiaque (fréquence cardiaque durant anticipation – fréquence cardiaque basale). L'efficacité du coping préventif a été évaluée par le score de cohérence cardiaque mesuré pendant les interventions.

2.2.5.2. *Manuscript 5: Influence of personality traits on anticipatory anxiety and preventive interventions to cope with stress*

*Soumis dans Anesthesiology le 08-08-21*

**Sophie Schlatter**, (Ph.D)<sup>a,f</sup>, **Simon Louisy**, (MD)<sup>b</sup>, **Brice Canada** (PhD)<sup>c</sup>, **Corentin Théron**, (MD)<sup>b</sup>, **Aymeric Guillot**, (Ph.D)<sup>a</sup>, **Antoine Duclos**, (Ph.D)<sup>d,e</sup>, **Chris Blakeley** (MD)<sup>f</sup>, **Jean-Jacques Lehot**, (Ph.D)<sup>b,e,f</sup>, **Thomas Rimmelé**, (Ph.D)<sup>b,f,g</sup>, **Ursula Debarnot**, (Ph.D)<sup>a,h</sup>, **Marc Lilot** (Ph.D)<sup>b,e,f</sup>

a. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology, EA7424, F-69622 Villeurbanne, France.

b. Hospices Civils de Lyon, Departments of Anaesthesia and Intensive Care, Lyon, France.

c. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, Laboratory of Sport Vulnerabilities and Innovations, EA7428, Villeurbanne, France.

d. Hospices Civils de Lyon, Health Data Department, Lyon, France.

e. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, Research on Healthcare Performance (RESHAPE), INSERM U1290, Lyon, France.

f. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, High-fidelity medical simulation centre (CLESS), SAMSEI, Lyon, France.

g. Univ. Lyon, UCBL-Lyon 1, EA7426 “Pathophysiology of Injury-Induced Immunosuppression” (Pi3), Biomérieux-Hospices Civils de Lyon, Lyon, France.

h. Institut Universitaire de France.

## **ABSTRACT**

**Background:** The anticipation of stress is common to many clinical situations. If not efficiently managed, this anticipation leads to a significant stress reaction, affecting clinical performance. Both stress vulnerability and resilience are key determining factors for these risks. The aim of this study was to examine the influence of personality traits on anticipatory anxiety levels and the efficiency of stress coping interventions prior to simulated critical clinical situations.

**Methods:** This ancillary study included anaesthesiology and critical care residents who participated in a high-fidelity simulation 2019-2020 (randomized controlled trial NCT04141124). Each resident was exposed to the anticipation of a simulated critical care event. Before the stressful scenario, the resident was randomized to a control condition or a stress coping intervention consisting of either relaxing breathing alone or combined with biofeedback. Personality traits (neuroticism, conscientiousness, agreeableness, extraversion, openness) were assessed using the Big Five Inventory. Psycho-physiological anticipatory anxiety was assessed with the State Anxiety Inventory and cardiac reactivity (heart rate anticipation – basal). Preventive coping efficiency was assessed through the cardiac coherence score measured during the intervention.

**Results:** 147 residents were included. Neuroticism was positively correlated with anxiety ( $\beta = 8.12$ ,  $P = <0.001$ ) and cardiac reactivity ( $\beta = 3.41$ ,  $P = 0.036$ ). Conscientiousness ( $\beta = -3.30$ ,  $P = 0.036$ ) and extraversion ( $\beta = -3.53$ ,  $P = 0.002$ ) were negatively correlated with anxiety and with cardiac reactivity (extraversion,  $\beta = -2.94$ ,  $P = 0.029$ ). In both coping interventions, openness to experiences was positively associated with cardiac coherence (relaxing breathing,  $\beta = 65.13$ ,  $P = 0.010$ ; biofeedback,  $\beta = 44.74$ ,  $P = 0.038$ ).

**Conclusions:** Neuroticism is associated with vulnerability to anxiety, whereas conscientiousness and extraversion provide some resistance to anxiety. Openness is associated with greater coping abilities. The data highlighted the importance of considering personality in the management of anticipatory anxiety.

**Keywords:** Personality, Critical situation, Resilience, HRV biofeedback, Simulation

## Introduction

Anaesthesiology and intensive care medicine are recognized to be among the most stressful medical specialties, due to daily emergencies, critical clinical situations, and exposure to a high level of responsibility (Sanfilippo et al., 2017). High stress levels are associated with decreased wellbeing and the development of many mental and cardiovascular disorders, (Chida and Steptoe, 2010; Treiber et al., 2003) and with poorer quality of care and increased risks of patient safety incidents (Firth-Cozens and Greenhalgh, 1997; Panagioti et al., 2018). Therefore, it is of importance to prevent the occurrence of stress as early as possible. Several clinically stressful situations which induce a psycho-physiological stress response (i.e., anticipatory anxiety) can be identified beforehand. This allows the determination of the resources (stress coping interventions) available to cope with the situation (Lazarus, 1966).

Identifying the factors affecting susceptibility to anticipatory anxiety is useful to individualize stress management training and improve performance during stressful situations. However, no previous study identified individual vulnerability factors for anticipatory anxiety in anaesthesiologists and intensive care providers. Personality defines inter-individual differences as it determines thoughts, emotions, and modulates performance (Schell et al., 2012). As personality influences the cognitive appraisal of the event, it is expected that it interacts with all periods of stress from anticipation up to recovery (Schneider, 2004; Soliemanifar et al., 2018). The Five Factor Model characterizes personality into five traits: neuroticism, extraversion, agreeableness, conscientiousness, openness to experiences (Digman, 1990). In the general population, these personality traits have been repeatedly linked to many aspects of the stress response (e.g., cardiac reaction, cortisol secretion, psychological stress) (Bibbey et al., 2013; Ferguson, 2008; Jonassaint et al., 2009; Kirschbaum et al., 1995; Ó Súilleabháin et al., 2018; Schneider, 2004; Soliemanifar et al., 2018; Williams et al., 2009; Xin et al., 2017).

While the impact of personality on acute stress reactivity has been widely explored, its putative influence on the efficiency of coping interventions remains less investigated (Lazarus and Folkman, 1984; Pardine and Napoli, 1977). Some studies showed that personality modulates the efficiency of various interventions such as electrodermal biofeedback, muscular relaxation, mindfulness, and cerebral stimulation (Nyklíček and

Irrmischer, 2017b; Pardine and Napoli, 1977; Peciuliene et al., 2015; Peña-Gómez et al., 2011; Zohar et al., 2013). Relaxing breathing paired with cardiac biofeedback is one of the most efficient coping techniques. It permits a significant reduction of psycho-physiological stress markers notably during the anticipation of a stressful event (DeWitte et al., 2019; Goessl et al., 2017b; Schlatter et al., 2021; Subhani et al., 2018; VanDiest et al., 2014). However, the influence of personality on relaxing breathing, paired or not with a cardiac biofeedback, remains unknown.

While an anaesthesiologist's personality traits are expected to be important predictive factors in their stress response, their specific interactions with both anticipatory anxiety and coping efficiency remain to be determined. Thus, the present study aimed to explore the influence of the personality traits of anaesthesiology and critical care residents when preparing to face a simulated clinical critical situation. First, this research determined which traits of personality influenced anticipatory anxiety in its psychological and physiological dimensions. Second, it examined whether personality influenced the effectiveness of preventive coping interventions including relaxing breathing paired or not with a cardiac biofeedback.

## **Materials and Methods**

### ***Ethics approval / licence / registration***

The study was approved by the Institutional Review Board of Claude Bernard University Lyon 1 (Lyon, France, IRB 2019\_07\_09\_03, July 2019) and written consent was obtained from all participants. The randomized controlled trial was registered, prior to participant enrolment, at clinicaltrials.gov (NCT04141124, Date of registration: 28 October 2019). The study followed the recommendations of the International Committee of Medical Journal Editors.

### ***Population and setting***

The study involved all anaesthesiology and critical care residents from the first to the fifth year who participated in high-fidelity simulation at the medical simulation centre of Lyon University during the academic year 2019-2020.

### ***Design***

The study presented here is an ancillary study of a more exhaustive research project. The larger research project was a prospective randomized controlled study involving three parallel arms and a hypothesis of superiority (1:1:1 allocation). A blinded investigator assigned each session of simulation to one intervention (relaxing breathing, relaxing breathing paired with a cardiac biofeedback, control). Then, following simple computerized randomization procedures, residents were randomly allocated to a session of simulation. Four investigators evaluated eligibility, provided information about the study, collected written individual informed consent, and enrolled residents.

### ***Simulation***

In the larger project the simulation was divided into different periods: briefing (2 min, anticipation), coping intervention (5 min, coping), scenario (15 min, stressful event), personalized debriefing (15 min), and a final resting state period when the collective

debriefing occurred (15 min, basal). In this ancillary study we focus on the anticipation and coping periods (Fig. 52).

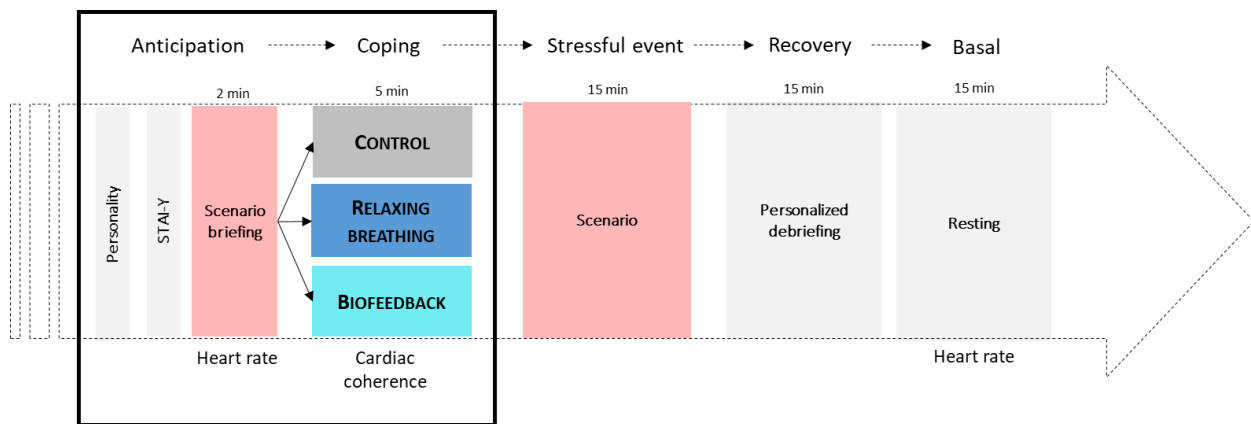


Figure 52. Protocol timeline. The residents came to the high-fidelity simulation centre, knowing that they will have to perform individually during a simulated critical situation. Their personality and their subjective level of anxiety (STAI-Y) were assessed. The involved residents first received the briefing for the scenario, followed by the intervention, the scenario, and the debriefing. Each participant was randomized into one of the three interventions. The control intervention consisted in reading biological test results. The relaxing breathing intervention consisted of an iterative sequence of 4 seconds of inspiration and 6 seconds of expiration. The biofeedback intervention consisted in the relaxing breathing exercise paired with the viewing of real-time cardiac parameters.

### **Personality**

Upon arrival, all residents filled-out a validated demographic questionnaire and the Big Five Inventory (BFI) (John et al., 1991; John and Srivastava, 1999; Plaisant et al., 2010). The BFI contains 45 items assessing conscientiousness, extraversion, openness to experience, neuroticism, and agreeableness. Each item assesses agreement or disagreement with descriptive statements on a 5-point Likert scale ranging from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree). Then, for each of the five personality traits, a mean was determined.

### **Anticipation period**

For assessing psychological anticipatory anxiety, all residents filled out the State Anxiety Inventory form A (STAI-Y) (Gauthier and Bouchard, 1993; Spielberger et al., 1983). Then, during the two minutes of the briefing, each participant received information on the scenario in which he/she will be involved. High-fidelity simulation attempts to reproduce critical clinical situations through realistic scenarios adapted to the expected competency level of anaesthesiology and intensive care residents (post graduate year).

For determining physiological anticipatory anxiety, a score of cardiac reactivity was computed (mean heart rate during anticipation *minus* mean heart rate basal) for each resident, with high scores of cardiac reactivity reflecting high physiological stress (Ó

Súilleabháin et al., 2018). Means were extracted from the continuous monitoring of cardiac activity (Hexoskin™, Carre Technologies Inc, Montreal, Quebec, Canada).

### **Coping period**

Following the briefing, residents were randomly assigned to one of the three 5 min interventions. All instructors leading the simulation were blinded to the randomization procedure and the group allocation.

Residents from the control group (CONTROL) reviewed normal printed laboratory test results. Residents from the relaxing breathing (RB) group performed standardized relaxing breathing at a 6 breaths/min rate (Fig. 2, left part). Residents from the cardiac biofeedback (BIOFEEDBACK) performed the same breathing exercise, and in addition they received information on their instantaneous heart rate (beats/min) and scores of cardiac coherence (Fig. 53, right part) (emWavePRO® interface, HeartMath technologies, Add Heart®).

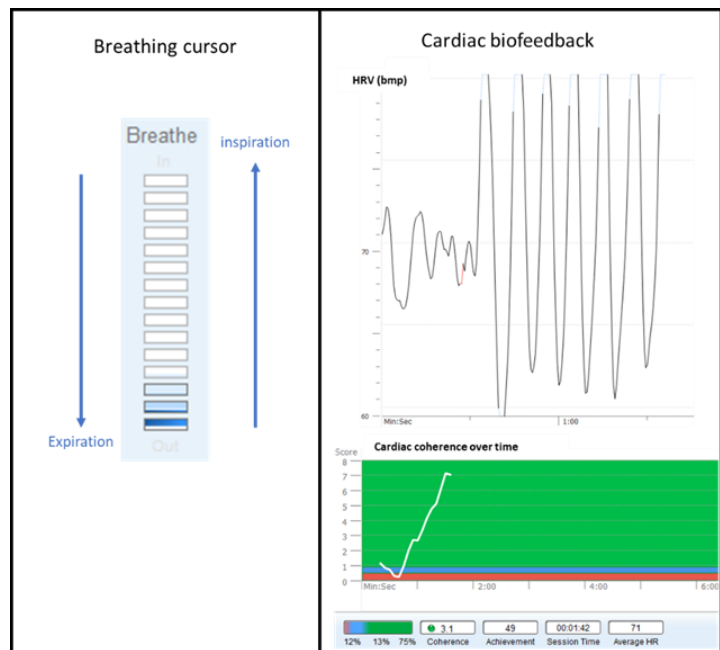


Figure 53. Interventions. Breathing cursor (left part) and cardiac biofeedback visual interface (right part: example of information provided to biofeedback group). The visual cursor driving the inspiration and expiration at a 6 breaths/min rate. The visual biofeedback gave information on instantaneous heart rate (beats/min) and scores of cardiac coherence (emWavePRO® interface, HeartMath technologies, Add Heart®).

All participants were attached to an ear pulse sensor recording the cardiac activity at 370 Hz (HeartMath technologies, Add Heart®). The cardiac coherence score was computed as:  $(\text{Peak Pwr} / [\text{Total Pwr} - \text{Peak Pwr}])$  on a min-by-min basis (Childre and Martin, 1999; McCraty et al., 2009c). A high cardiac coherence score has been associated with increased positive emotional regulation (McCraty and Zayas, 2014b; Schlatter et al., 2021; Shaffer et al., 2014). The cardiac coherence score achieved during the intervention was used to determine individual coping ability, with high scores corresponding to efficient physiological stress coping ability.



### ***Statistical analysis***

Linear regression analysis was used to predict both anticipatory anxiety (STAI-Y) and cardiac reactivity from personality traits. Each personality trait was analysed separately and all models controlled for gender, age, weight, size, amount of sport practiced per week, and post graduate year of residency. These demographical variables have been involved in psychophysiological stress response by previous studies. Linear regression analysis was used to predict cardiac coherence from personality traits. Each personality trait was analysed separately and all models controlled for gender, age, weight, size, amount of sport practiced per week, post graduate year of residency, group, and interaction term (trait X group).

Statistical analyses were performed with R studio version 1.2.1335 (R Foundation, Vienna, Austria). For all regression models the  $\beta$  (e.g., estimate the effect on the outcome of each 1-unit increase in the independent variable) and the adjusted coefficients  $R^2$  (e.g., percentage of variance explained) were provided. Normality of residuals of the models were checked. This study did not include an *a priori* sample size calculation, for the endpoints explored in the present experiment. Of note, the sample size was in the upper range of other interventional stress and personality studies (Schneider, 2004; Schneider et al., 2012; Xin et al., 2017).

## Results

### *Cohort characteristics*

A total of 147 participants were initially screened. Inclusions for analyses are shown in the study flowchart (Fig. 54). The personality traits have a good internal consistency and scale reliability [conscientiousness (Cronbach  $\alpha = 0.77$ ), extraversion ( $\alpha = 0.88$ ), openness to experience ( $\alpha = 0.56$ ), neuroticism ( $\alpha = 0.84$ ), and agreeableness ( $\alpha = 0.78$ )].

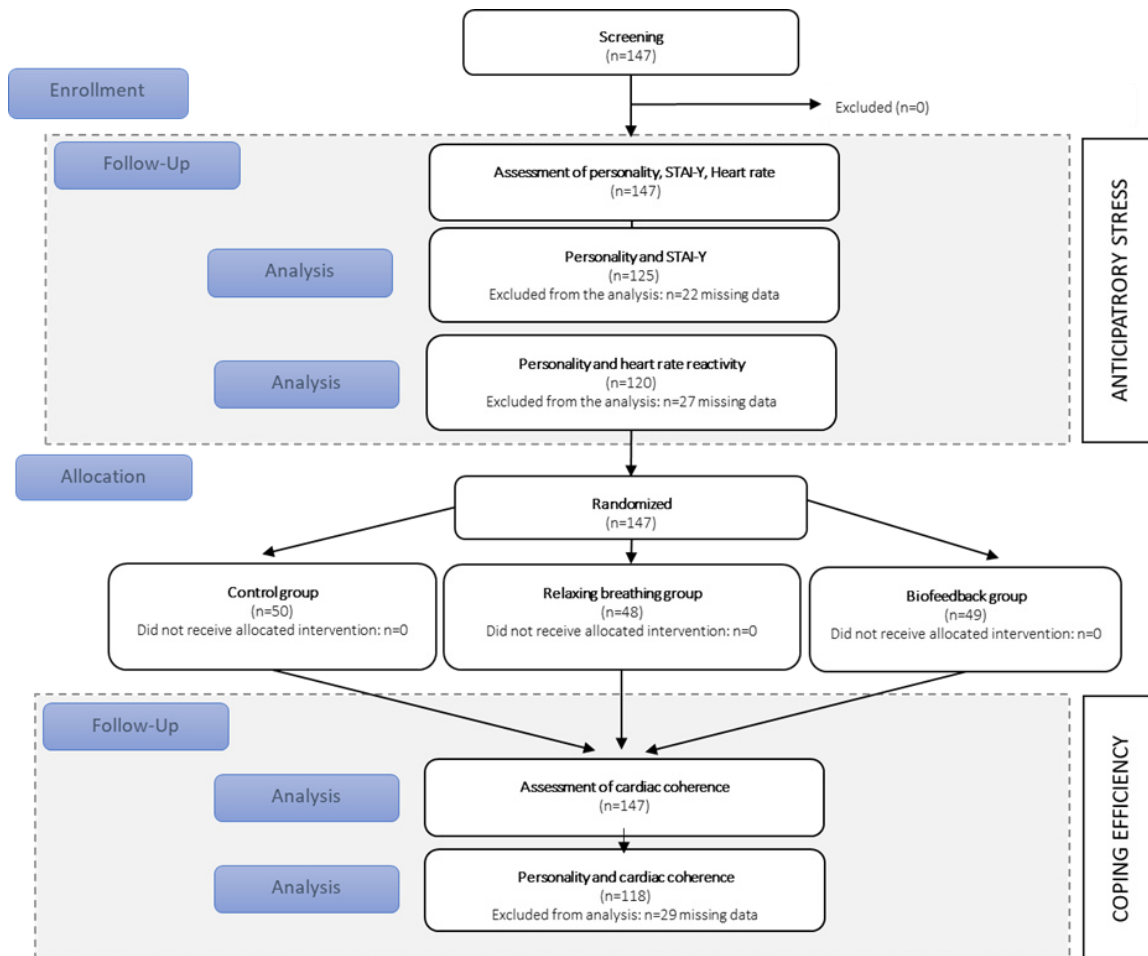


Figure 54. Study flowchart.

### Anticipatory anxiety

High scores for conscientiousness were associated with lower levels of psychological anticipatory anxiety ( $\beta = -3.30$ ,  $P = 0.036$ ). High scores for extraversion were associated with lower levels of psychological ( $\beta = -3.53$ ,  $P = 0.002$ ) and physiological anticipatory anxiety ( $\beta = -2.94$ ,  $P = 0.029$ ). Finally, high scores of neuroticism were associated with higher levels of psycho-physiological anticipatory anxiety ( $\beta = 8.12$ ,  $P < 0.001$ ,  $\beta = 3.41$ ,  $P = 0.036$ ) (Fig. 55, Tableau 6).

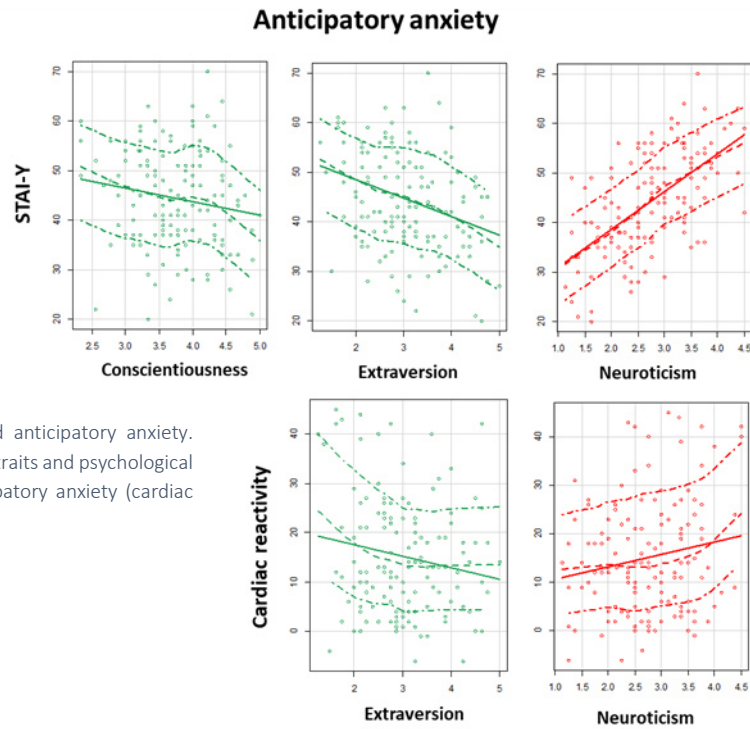


Figure 55. Personality traits and anticipatory anxiety. Association between personality traits and psychological (STAI-Y) and physiological anticipatory anxiety (cardiac reactivity).

Tableau 6. Adjusted regression models for each personality trait and anticipatory anxiety (STAI-Y and cardiac reactivity) (n=120). Significant relationships of the model analyses are in bold. SE is the standard error. STAI-Y = State Anxiety Inventory.

		$\beta$	SE	P	Adjusted R <sup>2</sup>
STAI-Y (Psychological Anticipatory anxiety)	Openness	-3.081	1.691	0.071	0.046
	<b>Conscientiousness</b>	<b>-3.304</b>	1.558	<b>0.036</b>	0.056
	<b>Extraversion</b>	<b>-3.526</b>	1.111	<b>0.002</b>	0.097
	Agreeableness	-0.841	1.775	0.636	0.023
	<b>Neuroticism</b>	<b>8.116</b>	1.062	<b>&lt;0.001</b>	0.346
Cardiac reactivity (Physiological Anticipatory anxiety)	Openness	-1.377	2.021	0.497	-0.002
	Conscientiousness	-1.485	1.893	0.435	-0.001
	<b>Extraversion</b>	<b>-2.937</b>	1.329	<b>0.029</b>	0.036
	Agreeableness	3.661	2.056	0.078	0.022
	<b>Neuroticism</b>	<b>3.412</b>	1.611	<b>0.036</b>	0.033

### Personality and coping efficiency

High scores of openness were associated with greater scores of cardiac coherence in both the RB ( $\beta = 65.13$ ,  $P = 0.010$ ) and BIOFEEDBACK ( $\beta = 44.74$ ,  $P = 0.038$ ) groups. No other personality trait was associated with the score for cardiac coherence (Fig. 56, Tableau 7).

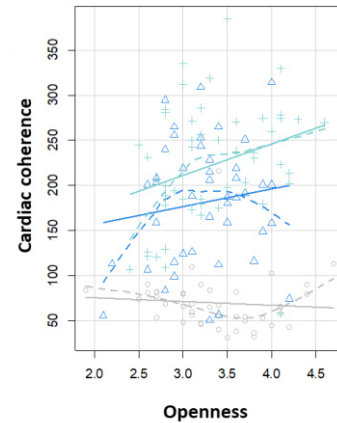


Figure 56. Openness trait and cardiac coherence score. Scatterplot of the relationship between openness and interventions. The grey circles indicate the control group, the dark blue triangles indicate the relaxing breathing group and the turquoise crosses indicate the biofeedback

Tableau 7. Adjusted regression models for each personality trait and cardiac coherence (n=118). Significant relationships of the model analyses are in bold. SE is the standard error.

		$\beta$	SE	P	Adjusted R <sup>2</sup>	
Openness	TRAIT	-13.84	15.85	0.385	0.633	
	RELAXING BREATHING	-97.96	82.87	0.240		
	BIOFEEDBACK	3.79	72.40	0.958		
	TRAIT x RELAXING BREATHING	<b>65.13</b>	24.98	<b>0.010</b>		
	TRAIT x BIOFEEDBACK	<b>44.74</b>	21.27	<b>0.038</b>		
Conscientiousness	TRAIT	-2.77	15.55	0.859	0.608	
	RELAXING BREATHING	44.39	83.12	0.594		
	BIOFEEDBACK	273.91	86.28	<b>0.002</b>		
	TRAIT x RELAXING BREATHING	18.30	21.98	0.407		
	TRAIT x BIOFEEDBACK	-32.62	22.68	0.153		
Cardiac coherence score	Extraversion	TRAIT	-5.691	10.33	0.583	0.599
		RELAXING BREATHING	109.00	47.49	<b>0.024</b>	
		BIOFEEDBACK	78.07	49.85	0.120	
		TRAIT x RELAXING BREATHING	0.85	15.25	0.956	
		TRAIT x BIOFEEDBACK	24.19	15.57	0.123	
Agreeableness	TRAIT	-4.23	21.17	0.842	0.615	
	RELAXING BREATHING	245.22	107.30	<b>0.024</b>		
	BIOFEEDBACK	224.86	123.51	0.071		
	TRAIT x RELAXING BREATHING	-32.99	25.93	0.206		
	TRAIT x BIOFEEDBACK	-16.67	29.23	0.570		
Neuroticism	TRAIT	-1.08	12.90	0.933	0.590	
	RELAXING BREATHING	91.37	49.02	0.065		
	BIOFEEDBACK	166.51	46.23	<b>&lt;0.001</b>		
	TRAIT x RELAXING BREATHING	7.75	17.40	0.657		
	TRAIT x BIOFEEDBACK	-4.98	16.27	0.760		

## Discussion

The aim of this research was to explore the influence of personality traits on psycho-physiological anxiety during the period prior to a stressful event (simulation) in anaesthesiologists and critical care residents. The present research found that neuroticism correlated with an increase in psycho-physiological anticipatory anxiety, while the opposite occurred with extraversion and conscientiousness. Openness has been found to positively predict the efficiency of relaxing breathing and biofeedback coping interventions.

Despite the importance of determining individual factors leading to professional stress sensitivity, no previous study had determined the influence of personality in anaesthesiologists and intensive care residents. Overall, our results revealed that the influence of personality traits on anticipatory anxiety is similar to that found during the occurrence of the stress event (Bibbey et al., 2013; Xin et al., 2017). Especially, the results for an extraversion trait are consistent with previous findings demonstrating that higher extraversion was associated with a lower stress reaction (e.g., lower cortisol stress response and psychological stress) in healthy volunteers (Jonassaint et al., 2009; Kirschbaum et al., 1995; Xin et al., 2017). This negative relationship observed in the present study on psychological and physiological levels indicates the reproducibility of those results in anaesthesia and intensive care residents. Conscientiousness was also associated with higher resilience (i.e., less anticipatory anxiety); previous studies found that individuals with high conscientiousness traits demonstrated a greater use of problem-focused coping (Mirnics et al., 2013; Shewchuk et al., 1999; Watson and Hubbard, 1996). It is possible that residents with high conscientiousness focused on the scenario problem solving, and were consequently more confident of having the resources (knowledge and skill) necessary to deal with the situation. High levels of confidence turn into lower levels of anxiety. Future studies, characterising level of confidence and usual strategies for coping might better determine how residents' personalities interact with anticipatory anxiety.

Another main result is that a higher score for neuroticism trait predicted stronger psycho-physiological anticipatory anxiety in residents. Although the influence of neuroticism on psychological stress is well-known, its relationship with the physiological stress remains more controversial (Bibbey et al., 2013; Schneider, 2004; Soliemanifar et al., 2018). Some studies showed that higher neuroticism traits were associated with lower cortisol secretion, and

lesser heart rate stress reactivity (Bibbey et al., 2013; Xin et al., 2017). The main reason that may explain such psycho-physiological discrepancy is that the neuroticism trait might lead to a maladaptive blunted stress response (Bibbey et al., 2013). Bibbey and collaborators found blunted stress reactivity in a middle aged sample (40-65 years old) with a high neuroticism trait (Bibbey et al., 2013). We suppose that residents here were too young to display a maladaptive stress response. Future studies assessing the relationship between neuroticism and anxiety in more experienced clinicians will help to determine how personality might be a generalizable tool for assessing vulnerability to anticipatory stress. As neuroticism has been reported to influence psychological distress and burnout in anaesthesiologists (Van Der Wal et al., 2018, 2016), identifying personality traits as early as possible is important to implement individual prevention strategies.

Finally, this study explored which personality trait influenced the efficiency of coping during the anticipation of a critical care scenario. Openness appeared to be an important predictor of the effectiveness of preventive coping interventions (i.e., relaxing breathing and biofeedback interventions). Residents with a higher score for the openness to experiences trait achieved higher cardiac coherence scores when practicing stress coping interventions. During a stressful event, scoring higher in openness has been reported to lead to a greater feeling of task-control (Bibbey et al., 2013); as both coping interventions rely on breathing-control, it is possible that openness leads to more effective adherence to new breathing control exercises and more effective stress reduction (McCrae and John, 1992). Similarly, Penley and Tomaka showed that openness was positively associated with perceived coping ability, control over the task, and active coping (Penley and Tomaka, 2002). Such preventive coping benefits might also apply during a stressful event (Xin et al., 2017).

This study had strengths and limits. A strong point is the bi-modal assessment of stress. The psychological and physiological variables shared the same relationship patterns, providing more consistency to the conclusions. Inconsistency in personality findings has been raised previously, and the absence of controlling demographical variables was one of the major explanations given (Bibbey et al., 2013; Xin et al., 2017). The models used here adjusted for relevant demographic variables (e.g., gender, age, weight, size) allowing for comparisons with future studies and so the reproducibility of the present findings. The characterisation of anticipatory anxiety could have been enhanced by other psycho-physiological markers, for

instance salivary cortisol will detect if personality affects the hypothalamo-pituitary-adrenal axis differently. Similarly, taking into account fear of negative evaluation and anxiety, should help to define a more complete picture (Musa et al., 2004). As a final remark, the influence of personality was explored in a simulated context. Thus, before advising the use of personality as a mean of detecting stress-vulnerability and being formally implemented in real clinical practice, replication of the present findings in a real clinical setting are certainly needed.

To conclude, personality traits are associated with different levels of anticipatory anxiety and effectiveness of preventive coping interventions for anaesthesia and intensive care residents exposed to critical care simulation. These data encourage the assessment of personality for identifying stress vulnerability and offering dedicated specific stress management training including relaxing breathing and cardiac biofeedback.

## References

- Bibbey A, Carroll D, Roseboom TJ, Phillips AC, Rooij SR de: Personality and physiological reactions to acute psychological stress. *Int J Psychophysiol* 2013; 90:28–36
- Chida Y, Steptoe A: Greater cardiovascular responses to laboratory mental stress are associated with poor subsequent cardiovascular risk status: A meta-analysis of prospective evidence. *Hypertension* 2010; 55:1026–32
- Childre D, Martin H: *The HeartMath solution*, Harper. San Francisco, 1999
- Contrada RJ, Baum A: *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*, Springer P. New York, 2010
- DeWitte NAJ, Buyck I, Daele T Van: Combining Biofeedback with Stress Management Interventions: A Systematic Review of Physiological and Psychological Effects. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2019; 0:1–14
- Digman J: Personality Structure: Emergence of the Five-Factor Model. *Annu Rev Psychol* 1990; 41:417–40
- Treiber FA, Kamarck T, Schneiderman N, Sheffield D, Kapuku G, Taylor T: Cardiovascular reactivity and development of preclinical and clinical disease states. *Psychosom Med* 2003; 65:46–62
- Ferguson E: Health anxiety moderates the daytime cortisol slope. *J Psychosom Res* 2008; 64:487–94
- Firth-Cozens J, Greenhalgh J: Doctors' perceptions of the links between stress and lowered clinical care. *Soc Sci Med* 1997; 44:1017–22
- Gauthier J, Bouchard S: Adaptation Canadienne-Française de la forme révisée du State-Trait Anxiety Inventory de Spielberger. *Can J Behav Sci* 1993; 25:559–78
- Goessl VC, Curtiss JE, Hofmann SG: The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety : a meta-analysis. *Psychol Med* 2017; 47:2578–86
- John O, Donahue E, Kentle R: *The Big Five Inventory-Versions 4a and 54*. *Inst Personal Soc Res* 1991
- John O, Srivastava S: The Big Five trait taxonomy: history, measurement, and theoretical perspectives., *Handbook of personality: theory and research*, 2nd editio. New York, Guilford press, 1999, p 102
- Jonassaint CR, Why YP, Bishop GD, Tong EM, Diong SM, Enkelmann HC, Khader M, Ang J: The effects of Neuroticism and Extraversion on cardiovascular reactivity during a mental and an emotional stress task. *Int J Psychophysiol* 2009; 74:274–9
- Kirschbaum C, Prussner JC, Stone AA, Federenko I, Gaab J, Lintz D, Schommer N, Hellhammer DH: Persistent high cortisol responses to repeated psychological stress in a subpopulation of healthy men. *Psychosom Med* 1995; 57:468–74

- Lazarus RS: *Psychological Stress and the Coping Process*. Edited by McGrawHill. New York, 1966
- Lazarus RS, Folkman S: *Stress, appraisal, and coping*, Springer P. New York, 1984
- McCrae RR, John OP: An introduction to the Five-Factor Model and Its Applications. *J Pers* 1992; 60:1–3
- Penley J, Tomaka J: Associations among the Big Five, emotional responses, and coping with acute stress. *Pers Individ Dif* 2002; 32:1215–28
- McCraty R, Atkinson M, Tomasino D, Bradley RT: The coherent heart. *Integr Rev* 2009; 5:10–115
- McCraty R, Zayas MA: Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability and psychosocial well-being. *Front Psychol* 2014; 5:1–13
- Mirnic Z, Heincz O, Bagdy G, Surányi Z, Gonda X, Benko A, Molnar E, Jakšić N, Lazary J, Juhasz G: The relationship between the big five personality dimensions and acute psychopathology: Mediating and moderating effects of coping strategies. *Psychiatr Danub* 2013; 25:379–88
- Musa C, Kostogianni N, Lépine J-P: Échelle de peur de l'évaluation négative (FNE) : propriétés psychométriques de la traduction française. *Encephale* 2004; 30:517–24
- Nyklíček I, Irmischer M: For Whom Does Mindfulness-Based Stress Reduction Work? Moderating Effects of Personality. *Mindfulness (N Y)* 2017; 8:1106–16
- Ó Súilleabháin PS, Howard S, Hughes BM: Openness to experience and adapting to change: Cardiovascular stress habituation to change in acute stress exposure. *Psychophysiology* 2018; 55
- Panagioti M, Geraghty K, Johnson J, Zhou A, Panagopoulou E, Chew-Graham C, Peters D, Hodkinson A, Riley R, Esmail A: Association between Physician Burnout and Patient Safety, Professionalism, and Patient Satisfaction: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Intern Med* 2018; 178:1317–30
- Pardine P, Napoli A: Personality correlates of successful biofeedback training. *Percept Mot Skills* 1977; 45:1099–103
- Peciuliene I, Perminas A, Gustainiene L, Jarasiunaite G: Effectiveness of Progressive Muscle Relaxation and Biofeedback Relaxation in Lowering Physiological Arousal among Students with Regard to Personality Features. *Procedia - Soc Behav Sci* 2015; 205:228–35
- Peña-Gómez C, Vidal-Piñero D, Clemente IC, Pascual-Leone Á, Bartrés-Faz D: Down-regulation of negative emotional processing by transcranial direct current stimulation: Effects of personality characteristics. *PLoS One* 2011; 6:e22812
- Plaisant O, Courtois R, Réveillère C, Mendelsohn GA, John OP: Validation par analyse factorielle du Big Five Inventory français (BFI-Fr). Analyse convergente avec le NEO-PI-R. *Ann Med Psychol (Paris)* 2010; 168:97–106
- Schell RM, Dilorenzo AN, Li HF, Fragneto RY, Bowe EA, Hessel EA: Anesthesiology resident personality type correlates with faculty assessment of resident performance. *J Clin Anesth* 2012; 24:566–72
- Schlatter S, Schmidt L, Lilot M, Guillot A, Debarnot U: Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress. *Behav Res Ther* 2021; 0:accepted
- Schneider TR: The role of neuroticism on psychological and physiological stress responses. *J Exp Soc Psychol* 2004; 40:795–804
- Schneider TR, Rench TA, Lyons JB, Riffle RR: The influence of neuroticism, extraversion and openness on stress responses. *Stress Heal* 2012; 28:102–10
- Sanfilippo F, Noto A, Foresta G, Santonocito C, Palumbo GJ, Arcadipane A, Maybauer DM, Maybauer MO: Incidence and factors associated with burnout in anesthesiology: A systematic review. *Biomed Res Int* 2017 doi:10.1155/2017/8648925
- Shaffer F, McCraty R, Zerr CL: A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front Psychol* 2014; 5:1–19
- Shewchuk RM, Elliott TR, Macnair-Semands RR, Harkins S: Trait Influences on Stress Appraisal and Coping: An Evaluation of Alternative Frameworks. *J Appl Soc Psychol* 1999; 29:685–704
- Solimanifar O, Soleymanifar A, Afrisham R: Relationship between personality and biological reactivity to stress: A review. *Psychiatry Investig* 2018; 15:1100–14
- Solimanifar O, Soleymanifar A, Afrisham R: Relationship between Personality and Biological Reactivity to Stress: A Review. *Psychiatry Investig* 2018; 15:1100–14



Spielberger C, Gorsuch R, Lushene P, Vagg P, Jacobs A: Manual for the State Trait Anxiety Inventory (Form Y). Palo Alto, CA, Consulting Psychologists Press., 1983

Subhani AR, Kamel N, Saad MNM, Nandagopal N, Kang K, Malik AS: Mitigation of stress: new treatment alternatives. Cogn Neurodyn 2018; 12:1–20

VanDiest I, Verstappen K, Aubert AE, Widjaja D, Vansteenwegen D, Vlemincx E: Inhalation/Exhalation Ratio Modulates the Effect of Slow Breathing on Heart Rate Variability and Relaxation. Appl Psychophysiol Biofeedback 2014; 39:171–80

Wal RAB Van Der, Wallage J, Bucx MJL: Occupational stress, burnout and personality in anesthesiologists. Curr Opin Anaesthesiol 2018; 31:351–6

Wal RAB Van Der, Bucx MJL, Hendriks JCM, Scheffer GJ, Prins JB: Psychological distress, burnout and personality traits in Dutch anaesthesiologists. Eur J Anaesthesiol 2016; 33:179–86

Watson D, Hubbard B: Adaptational Style and Dispositional Structure: Coping in the Context of the Five-Factor Model. J Pers 1996; 64:737–74

Williams PG, Rau HK, Cribbet MR, Gunn HE: Openness to Experience and stress regulation. J Res Pers 2009; 43:777–84

Xin Y, Wu J, Yao Z, Guan Q, Aleman A, Luo Y: The relationship between personality and the response to acute psychological stress. Sci Rep 2017; 7:1–8

Zohar AH, Cloninger CR, McCraty R: Personality and Heart Rate Variability: Exploring Pathways from Personality to Cardiac Coherence and Health. Open J Soc Sci 2013; 01:32–9

### 2.2.5.3. Conclusion

La présente étude visait à explorer l'impact de la personnalité sur le stress d'anticipation et l'efficacité de techniques de gestion du stress (respiration relaxante ou associée à un VFC-RETRO) chez les internes en anesthésie et réanimation. Alors que la littérature scientifique a largement montré l'implication des traits de personnalité dans les réponses de stress aigu (Soliemanifar et al., 2018), notre étude est, à notre connaissance, la première à s'intéresser spécifiquement aux interactions durant la période d'anticipation d'un évènement stressant. Nos résultats montrent que les traits d'extraversion et de conscienciosité confèrent une certaine « protection » face au stress d'anticipation, c'est-à-dire que plus les individus ont des scores élevés sur ces traits, moins leurs réponses de stress d'anticipation sont élevées. A l'inverse, les internes présentant des hauts niveaux de névrosisme sont plus sensibles au stress d'anticipation et présentent des réponses psychophysologiques plus élevées (STAI-E et réactivité cardiaque) (Fig. 57).

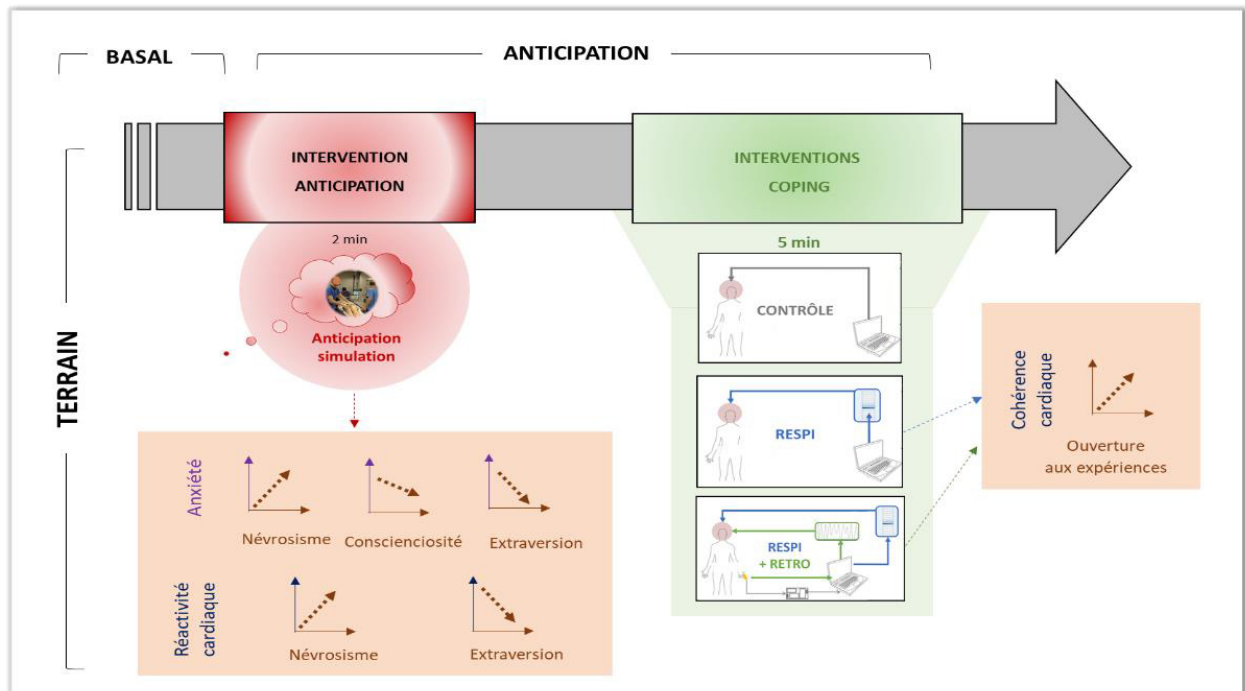


Figure 57. Schématisation du protocole et des résultats principaux de l'étude 7. L'anticipation simulation correspond à la période de briefing : c'est le moment où les professionnels de santé sont informés du cas clinique qu'ils devront prendre en charge. Le stress d'anticipation a été évalué avec le STAI-E et la réactivité cardiaque (fréquence cardiaque anticipation – fréquence cardiaque basal). Le névrosisme est un facteur de sensibilité au stress d'anticipation, alors que l'extraversion et la conscienciosité sont des facteurs de résilience. Plus les internes présentent des traits d'ouverture aux expériences élevés, plus ils sont susceptibles d'obtenir des hauts scores de cohérence cardiaque via la pratique de la respiration relaxante seule ou couplée au VFC-RETRO.

Notre étude a également montré que les personnes les plus ouvertes aux expériences sont les personnes qui obtiennent le plus de bénéfices de la pratique du VFC-RETRO et de la respiration relaxante. Ces techniques pourraient donc leur être proposées en priorité. Dorénavant, les futures études devront définir l'impact de la personnalité sur d'autres techniques de gestion émotionnelle. En effet, déterminer les interactions entre névrosisme et efficacité des techniques semble de première nécessité chez cette population. Il est possible que les individus présentant des hauts traits de névrosisme bénéficient plutôt d'interventions régulières telles que la méditation de pleine conscience (Nyklíček et Irmischer, 2017).

La question de la santé mentale des étudiants en médecine et notamment des internes apparaît comme préoccupante compte tenu des derniers rapports et témoignages de surmenage professionnel émergeant ces dernières années<sup>47</sup>. Ainsi, le stress vécu, à la fois aigu et chronique, est l'une des causes majeures du développement des syndromes d'épuisement

<sup>47</sup> <https://xn--tudiant-9xa.es/etudiant-sante-mentale-covid/>  
<https://www.santementale.fr/2021/04/sante-mentale-des-etudiants-faut-il-une-pandemie-pour-reveler-leurs-difficultes/>  
<http://www.psychomedia.qc.ca/psychologie/2018-11-19/burnout-etudiants-en-medecine>  
[https://www.francetvinfo.fr/sante/psycho-bien-etre/pres-dun-etudiant-en-medecine-sur-deux-en-burn-out\\_3046667.html](https://www.francetvinfo.fr/sante/psycho-bien-etre/pres-dun-etudiant-en-medecine-sur-deux-en-burn-out_3046667.html)

professionnel que l'on observe pendant ces cursus. Identifier les facteurs de sensibilité le plus tôt possible dans les cursus de formation permettrait de proposer et d'ajuster des outils de gestion émotionnelle aux individus qui en ont le plus besoin, et ainsi limiter les impacts délétères du stress aigu et chronique. Le questionnaire de personnalité (*Big-five*), qui comprend 45 items, présente un haut niveau de reproductibilité et a été validé dans de nombreuses langues dont le Français <https://www.outofservice.com/bigfive/> (John et al., 1991; Plaisant et al., 2010). En pratique, ce questionnaire pourrait être complété par des étudiants ou jeunes professionnels. Les résultats pourraient ensuite être traités par le service de santé universitaire afin d'identifier les personnes à risque (i.e. haut en névrosisme) et de leur proposer des interventions adéquates (e.g. méditation de pleine conscience pour les individus présentant des hauts traits en névrosisme, VFC-RETRO pour les individus hauts en ouvertures aux expériences etc.). Ce questionnaire pourrait être utilisé comme moyen indirect de sensibilisation des étudiants aux questions du stress et à leur bien-être mental, nécessaire à une bonne pratique de leur futur métier. On pourrait aussi fournir aux étudiants le questionnaire et l'outil d'analyse, et leur proposer un temps d'échange sur les relations existantes entre personnalité, stress et efficacité des stratégies de coping.

Enfin, la question de la généralisation de nos résultats se pose. En effet, la personnalité des anesthésistes réanimateurs diffère à la fois de la population générale (Reeve, 1983) et de celle d'autres spécialités médicales (Markert et al., 2008; Maron et al., 2007). Ainsi, avant de conclure de manière générale sur l'impact des traits de personnalité sur le stress d'anticipation, des études sur d'autres populations restent nécessaires.

### 3. Discussion générale

#### 3.1. Caractérisation des effets du stress aigu sur les tâches cognitivo-motrices

Nos résultats montrent que l'imagerie implicite est détériorée par le stress alors que les capacités explicites sont maintenues (études 1, 2). Dans notre première étude, les données comportementales recueillies ont permis de poser l'hypothèse que l'impact délétère du stress sur la capacité d'imagerie implicite serait dû à une fixation trop importante de cortisol sur l'hippocampe. Pourtant, les structures cérébrales impliquées dans les deux types d'imagerie sont en grande partie similaires (Hétu et al., 2013; Osuagwu et Vuckovic, 2014). Ainsi, il est probable que la saturation en cortisol de l'hippocampe soit aussi observable pendant la tâche explicite. Toutefois nos résultats n'ont montré aucune détérioration de la tâche explicite. Ce constat laisse entrevoir que des processus additionnels aux effets neurophysiologiques présentés doivent entrer en jeu.

Étant donné que les tâches diffèrent par leur niveau de conscientisation (implicite/inconsciente *versus* explicite/consciente), nous proposons qu'une modification consciente de l'attention portée à la tâche module l'impact délétère du stress (Fig. 58). En condition de stress, les théories attentionnelles postulent que l'attention est dirigée vers la source du stress, cet effet tunnel justifiant ainsi la détérioration des performances (Vine et al., 2016).

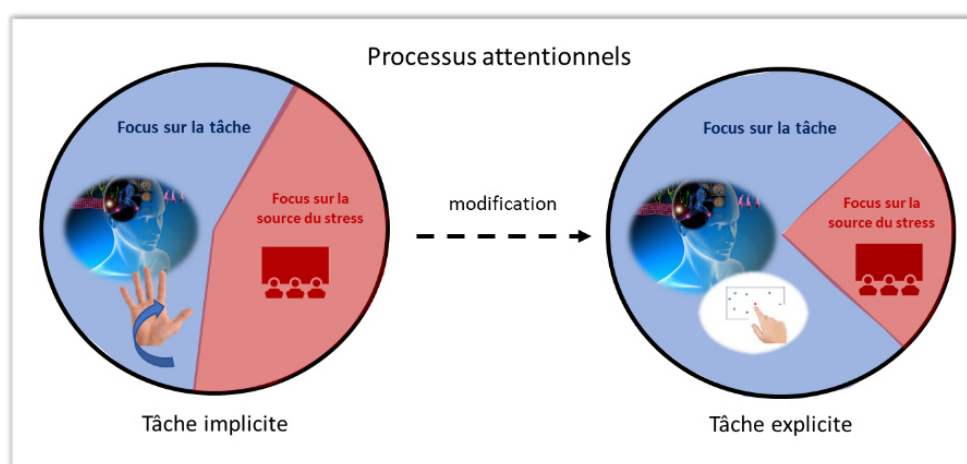


Figure 58. Illustration du partage des capacités attentionnelles durant l'imagerie motrice selon la nature de la tâche et en condition de stress. Lors d'une tâche d'imagerie implicite, une allocation importante de l'attention sur la source du stress engendrerait une détérioration de la performance. Lors d'un travail d'imagerie explicite (conscient), une part plus importante de l'attention est allouée à la tâche, permettant ainsi un maintien des capacités d'imagerie.

Nous suggérons que lors d'une tâche implicite l'attention est partagée entre la tâche et la source du stress, avec une allocation importante pour cette dernière. Plus précisément, si la tâche est réalisée pendant l'évènement stressant l'attention peut se porter sur les sources d'évaluations sociales (e.g. jury, caméra). Si la tâche est réalisée après, l'attention peut se porter sur les conséquences du stress (e.g. pensées internes négatives ruminantes). Le travail explicite exige, quant à lui, une attention focalisée sur le processus de création des images mentales. On observe alors une allocation attentionnelle à la tâche plus grande, limitant l'effet tunnel, et permettant de maintenir les capacités d'imagerie durant et après un évènement stressant (Fig. 58).

## 3.2. Techniques de remédiation du stress aigu

### 3.2.1. Techniques de stimulation cérébrale, stress et performances

Le CPFdl étant impliqué à la fois dans la régulation des émotions et des fonctions exécutives supérieures, nous avons posé l'hypothèse selon laquelle, comparativement à une condition contrôle, une STCC anodale sur le CPFdl diminuerait le stress et augmenterait les performances. Cependant nos résultats ont montré que la STCC, appliquée seule, ne permettait pas de limiter les réponses psychophysiologiques de stress et n'améliorait pas les performances exécutives (étude 4). Des données récentes révèlent que les effets de la STCC sur le CPFdl ne sont pas systématiques (Ankri et al., 2020). L'efficacité de la stimulation pourrait dépendre du délai entre l'application de la STCC et la tâche expérimentale, ou encore de la latéralité hémisphérique de la stimulation.

D'une part, il est donc possible que l'absence d'effets dans notre étude s'explique par les délais entre la stimulation et l'évènement stressant ( $\approx 4$  min), et entre la stimulation et l'évaluation des performances cognitives (délais entre fin de la stimulation et la fin des tâches cognitives  $\approx 45$  min). Bogdanov et Schwabe (2016) ont montré une amélioration des performances suite à un évènement stressant, lorsque la stimulation était délivrée en même temps que la tâche cognitive (stimulation *online*). Ainsi, il est également possible que les bénéfices de la STCC soient effectifs spécifiquement lorsque l'application est *online*.

D'autre part, l'absence d'effets pourrait s'expliquer par la latéralité hémisphérique de la région stimulée CPFdl (gauche *versus* droit) (CPFdl droit, Bogdanov et Schwabe, 2016). De nouvelles expériences sont donc nécessaires avant de conclure sur l'impact de la STCC sur la

gestion du stress. Sur la base de nos études préliminaires, de nombreux protocoles pourraient être envisagés (Fig. 59), par ailleurs il nous semble important que les futurs protocoles testent les effets d'une stimulation inversée au sein d'un même protocole (anodale gauche *versus* anodale droite).

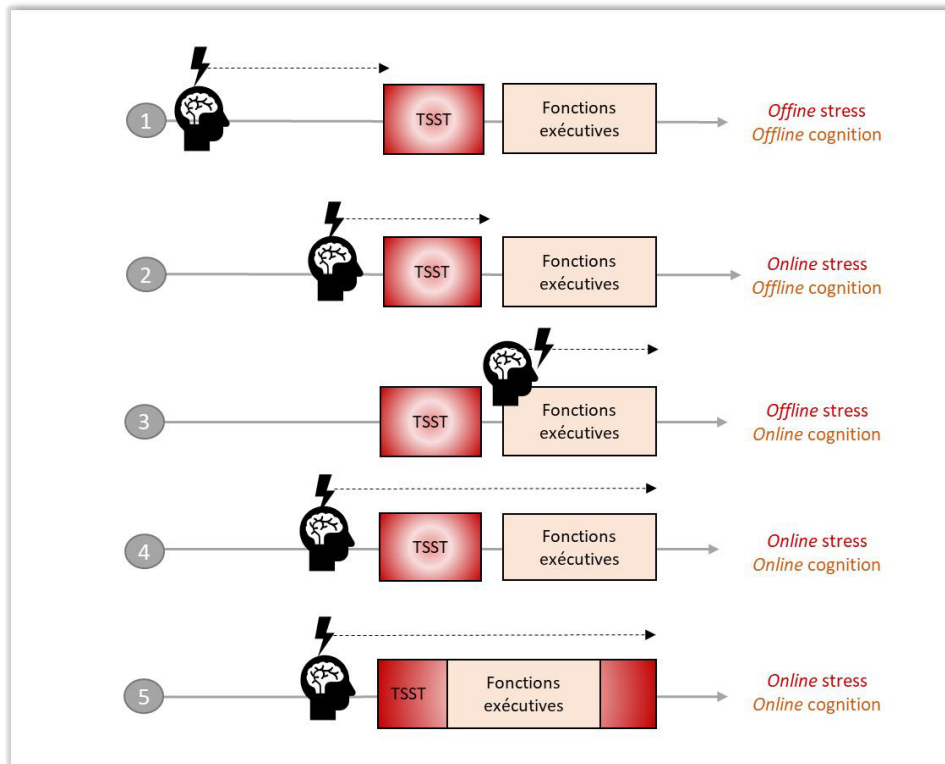


Figure 59. Proposition de protocoles expérimentaux permettant de caractériser l'impact de la STCC sur la gestion du stress et la prévention du déclin cognitif fréquemment observé pendant et après un événement stressant (e.g. le *Trier Social Stress Test (TSST)*). (1) Protocole pour déterminer les effets préventifs *offline* de la STCC sur la réponse psychophysiological du stress et les performances exécutives. Ce protocole pourrait être mis en place en amont d'une situation stressante réelle où une performance est attendue. (2) Protocole permettant de tester l'impact d'une STCC *online* pendant l'événement stressant. (3) Protocole permettant de tester si la STCC peut prévenir le déclin des fonctions exécutives post-événement stressant. (4) et (5) Stimulation *online* concomitante au stresser et aux tâches. Le 5<sup>-ème</sup> protocole est censé reproduire un événement stressant où une performance est attendue (ex : prise en charge d'une situation stressante, examens classants etc.). Basé sur la littérature, les stimulations pourraient être appliquées de 15 à 30 minutes.

### 3.2.2. Respiration couplée au VFC-RETRO sur les marqueurs du stress

L'apport du VFC-RETRO comparativement à un exercice de respiration seul restait jusqu'à présent peu exploré (Wells et al., 2012). Nos résultats ont montré l'avantage d'associer un VFC-RETRO à la respiration durant la période d'anticipation d'un événement stressant (étude 6). Les bénéfices du VFC-RETRO ont été observés sur les marqueurs psychophysiologicals. À notre connaissance, une seule étude avait comparé les effets d'un exercice de respiration standardisée, seul ou couplé à un VFC-RETRO, dans un contexte de performance professionnelle en situation de stress (Wells et al., 2012). Contrairement aux résultats

présentés ici, Wells et collaborateurs (2012) n'ont pas rapporté de bénéfices supplémentaires du VFC-RETRO, comparativement à la respiration seule. Leur protocole ne comparait toutefois que 15 individus par groupe, contrairement à notre étude 6 qui intègre une cinquantaine d'individus par groupe. Il est possible que des tailles d'échantillons trop faibles comme dans notre étude 5 (n=12 par groupe) et celle de Wells et collaborateurs ne permettaient pas de détecter les bénéfices ajoutés par le VFC-RETRO.

Par ailleurs, Wells et al. (2012) avaient comparé des interventions longues (30 minutes), alors que nos protocoles expérimentaux se sont intéressés à des interventions de très courte durée (5 minutes, études 5 et 6). Ainsi, il serait possible qu'un exercice de respiration long permette d'obtenir des gains similaires à ceux atteints avec l'ajout du VFC-RETRO (i.e. augmentation relaxation, cohérence cardiaque, ratio LF/HF). Ces bénéfices similaires peuvent s'expliquer soit par une augmentation de gains au cours du temps via la pratique de la respiration et/ou par une diminution des gains via la pratique du VFC-RETRO (Fig. 60). Nos résultats ont montré qu'une intervention de VFC-RETRO longue engendre de la fatigue ou de la lassitude. Dans notre étude 3, les participants effectuaient une intervention de VFC-RETRO de 15 minutes. Lors du débriefing de fin d'expérience, les participants ont massivement rapporté de la lassitude en fin d'exercice. Cet effet de "désengagement" s'est également traduit par une diminution des scores de cohérence cardiaque instantanés<sup>48</sup> (Fig. 60).

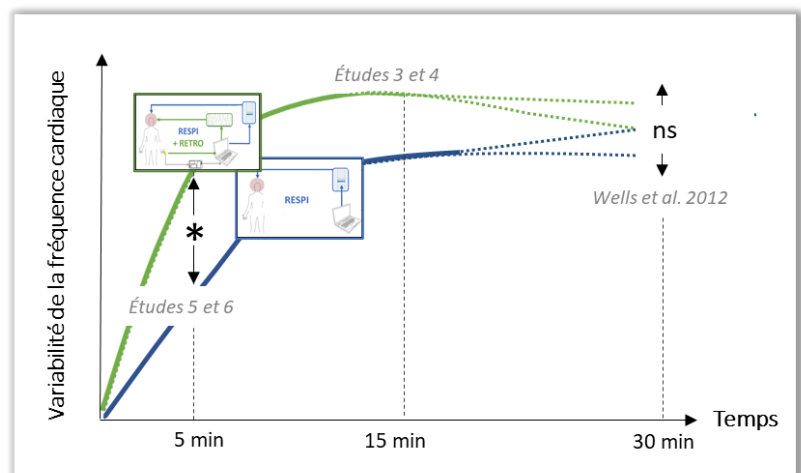


Figure 60. Modèle théorique de la relation entre respiration relaxante seule ou couplée au VFC-RETRO et les marqueurs de détente psychophysiologicals (e.g. augmentation relaxation, cohérence cardiaque, ratio LF/HF), en fonction du temps d'intervention.

### 3.2.3. VFC-RETRO couplé à la STCC sur les marqueurs du stress

Lorsque la STCC était appliquée de manière concomitante à un VFC-RETRO, les effets sur les marqueurs psychophysiologicals du stress ont été fortement potentialisés. En effet, la

<sup>48</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : définir la durée de pratique des techniques de coping.

combinaison de la STCC avec le VFC-RETRO a permis une plus grande diminution des marqueurs du stress physiologique (ratio LF/HF) et psychologique (EVA stress) que la pratique du VFC-RETRO seule. Étant donné que la STCC anodale a pour but de potentialiser temporairement les fonctions sous-tendues par l'aire stimulée (Thibaut et al., 2013), ces résultats confirment en partie l'implication causale du CPFdl dans la régulation émotionnelle. Brunoni et al. (2013) ont montré qu'une STCC anodale sur le CPFdl entraînait une réduction du niveau de cortisol et augmentait le contrôle cardiaque vagal pendant le visionnage de stimuli émotionnels négatifs. Nos résultats montrent que les effets de la STCC - sur la réponse de stress - s'observent uniquement lorsque la stimulation est couplée au VFC-RETRO. La présentation de stimuli négatifs, sans consignes spécifiques, nécessite un traitement cognitif moins complexe que l'anticipation et la confrontation avec un événement stressant. Nous supposons que la STCC appliquée seule améliore la régulation émotionnelle, mais que l'amplitude de son effet est trop faible pour être détectée par nos moyens de mesures. Par ailleurs, lorsque la STCC est couplée au VFC-RETRO, ses bienfaits sont cumulés et deviennent détectables. Un protocole en Sham<sup>49</sup> + VFC-RETRO permettrait très certainement d'approfondir la caractérisation des effets de la stimulation cérébrale dans les réponses de stress.

#### 3.2.4. VFC-RETRO sur la cognition

Ensemble, nos études suggèrent que le VFC-RETRO peut être utile pour limiter le déclin du fonctionnement cognitif fréquemment observé pendant un événement stressant. Nos résultats montrent que le VFC-RETRO permet d'améliorer les ressentis subjectifs de performances réalisées avant (i.e. pendant l'anticipation), pendant et après l'évènement stressant. Au laboratoire, les participants ont estimé que l'intervention avait eu un impact positif sur leurs performances cognitives (études 3, 4). En milieu immersif professionnel, les internes ont jugé que l'intervention avait contribué à améliorer leur prise en charge clinique (études 6). De manière non-systématique, certaines de nos études ont objectivé une concordance entre ces bénéfices subjectifs avec une augmentation de performance (études 4, 5). Nous supposons que la discordance entre les données subjectives et objectives au sein de nos études pourrait s'expliquer par des effets groupes. En effet, la prise en compte du niveau

---

<sup>49</sup> Le sham est la condition placebo de la Stimulation Transcrânienne à Courant Continu.



de base des individus dans notre étude 4 a permis d'attester l'impact positif du VFC-RETRO sur les performances en laboratoire. Afin d'approfondir l'impact objectif du VFC-RETRO dans une condition de stress écologique médical, il convient dorénavant de mettre en place un protocole de simulation en test-re-test. Un premier scénario de simulation pourrait être réalisé, puis quelques jours après un scénario de difficulté similaire précédé d'un VFC-RETRO (ou d'une condition contrôle) pourrait être renouvelé. Ce type de protocole permettrait de comparer les niveaux de performance intra-individuelle.

Au-delà des performances objectives, le fait que les participants jugent que la pratique du VFC-RETRO a contribué à l'amélioration des performances est important. Il est attendu que ce jugement modifie les évaluations cognitives à posteriori. En effet, les participants ont acquis une nouvelle ressource (i.e. connaissance du VFC-RETRO), ce qui leur aurait permis de changer leur perception des ressources internes pour faire face à une situation stressante future <sup>50</sup>. Dans la même idée, nos résultats montrent que les participants des groupes VFC-RETRO de terrain (étude 3) et de laboratoire (étude 5) jugent que le VFC-RETRO pourrait être utilisé dans leurs pratiques personnelles et professionnelles <sup>51</sup>. Ensemble, ces résultats montrent que les individus ont adhéré de manière immédiate à l'intervention et que la grande majorité envisage de ré-utiliser cet outil in situ.

### 3.2.5. VFC-RETRO, HRV et performances : modèles théoriques

Les résultats de nos études soulignent l'efficacité de la respiration relaxante et du VFC-RETRO pour augmenter la VFC et améliorer les performances exécutives.

- i)* Une partie de nos résultats montrent que la pratique de la respiration relaxante, seule ou couplée au VFC-RETRO engendre des amplitudes de fréquence cardiaque élevées. Précisément nous observons une amélioration de nombreux marqueurs de la VFC dans les domaines temporel (RMSSD, SDRR, pNN50) et fréquentiel (cohérence cardiaque, HF/LF) (études 3, 4, 6).
- ii)* En laboratoire, nous observons une augmentation des capacités inhibitrices, de flexibilité mentale et mnésique (diminution du nombre d'erreur) (étude 4). Durant une simulation haute-fidélité, nous observons une amélioration des performances techniques du

---

<sup>50</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : les modérateurs de l'axe HHAC.

<sup>51</sup> VAS-USE est construite de 0 : « absolument pas », à 10 « complètement ». Les notes retrouvées sont de 8/10 pour le laboratoire et de 8/10 pour les professionnels de santé.

professionnel de santé (étude 5). Ainsi, nos résultats démontrent que ces interventions permettent d'améliorer des performances qui nécessitent les fonctions exécutives supérieures, elles-mêmes liées aux activités du CPF (Miller et Cohen, 2001).

Nous proposons que l'impact positif de ces techniques sur les performances résulte de l'influence de la VFC sur certains réseaux cérébraux, et plus particulièrement sur le CPF. Tout d'abord, la pratique de la respiration relaxante, seule ou couplée au VFC-RETRO engendre des amplitudes de fréquence cardiaque élevées (Fig. 61, parties 1 et 2). Selon le modèle théorique de Mather et Thayer (2018)<sup>52</sup>, des amplitudes de fréquence cardiaque élevées stimuleraient l'activité oscillatoire et la connectivité des régions cérébrales associées à la régulation émotionnelle (Fig. 61, parties 3, 4, 5). Parmi les réseaux cérébraux impliqués dans la régulation émotionnelle, on retrouve le réseau exécutif central (REC) qui inclut le CPF (van Oort et al., 2017). Puisque ce dernier joue un rôle dans le traitement exécutif, nous postulons qu'une augmentation de son activité pourrait également induire une amélioration des performances exécutives (Fig. 61, partie 6). Ainsi nos résultats apporteraient une validité expérimentale de l'amélioration émotionnelle du modèle de Mather et Thayer, et complètent le modèle en suggérant que la cascade d'événements engendre également une amélioration des fonctions exécutives.

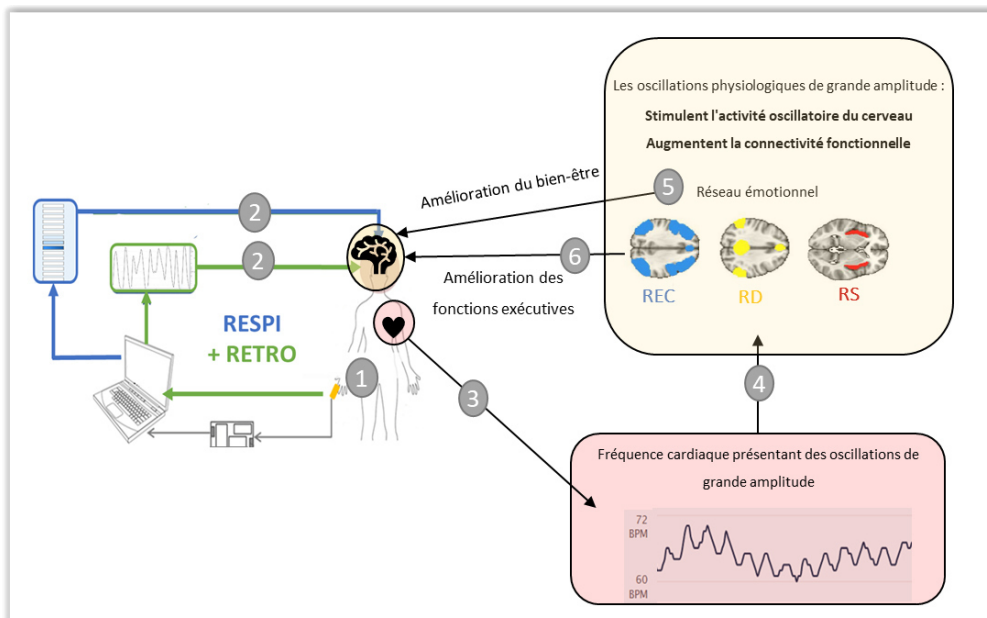


Figure 61. Relation entre VFC-RETRO, respiration relaxante, émotions et fonctions exécutives. (1) Recueil de la fréquence cardiaque. (2) Pratique de la respiration relaxante, seule ou associée à un VFC-RETRO. (3). Cette pratique permet d'augmenter l'amplitude des oscillations de la fréquence cardiaque. (4). Ces oscillations vont stimuler l'activité oscillatoire du cerveau et augmenter la connectivité fonctionnelle des réseaux cérébraux impliqués dans la régulation émotionnelle (REC : réseau exécutif central, réseau de mode à défaut, RS, réseau de saillance). (5) Ces modifications de niveau d'activité (i.e. connectivité fonctionnelle) se traduisent par une amélioration du bien-être émotionnel. (6) Ces modifications de niveau d'activité se traduisent à leur tour par une amélioration des performances exécutives.

<sup>52</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : impact de la VFC sur la régulation émotionnelle.

### 3.2.6. Personnalité, stress d'anticipation, et efficacité des stratégies de coping

Les techniques de respiration et de VFC-RETRO sont des outils particulièrement efficaces pour réduire les marqueurs du stress à l'échelle du groupe. Toutefois, nos résultats montrent l'importance de considérer les traits de personnalité dans les sensibilités au stress et l'efficacité des techniques proposées. Les individus avec un score de névrosisme (N<sup>+</sup>) élevé sont particulièrement sensibles au stress d'anticipation, alors que les individus présentant des traits d'ouverture aux expériences élevés (O<sup>+</sup>) bénéficieraient grandement du VFC-RETRO et de la respiration (étude 7). Les études les plus récentes sur la personnalité ont montré que certains assemblages de traits (e.g. les optimistes N<sup>-</sup>E<sup>+</sup>) sont associés à des profils de sensibilité spécifiques (Ironson et al., 2008). Nous postulons que les individus avec des traits de personnalité élevés en névrosisme (N<sup>+</sup>, sensible au stress d'anticipation) et en ouverture aux expériences (O<sup>+</sup>, réceptifs au VFC-RETRO) pourraient être particulièrement réceptifs aux techniques de gestion émotionnelles. De futures études pourraient dorénavant s'appliquer à définir les interactions entre les associations de traits de personnalité et d'autres techniques de gestion émotionnelles telles que le VFC-RETRO combiné à la STCC<sup>53</sup>. Ces identifications permettraient de se positionner dans le cadre d'une médecine individualisée.

### 3.3. Recommandations pratiques

Nos résultats ont permis de mettre en lumière la complexité du stress et l'utilité de mettre en place des protocoles pluridisciplinaires. Nos protocoles ainsi que l'approfondissement de la littérature nous ont permis d'identifier de nombreux points et questionnements méthodologiques. Ces identifications permettent d'élaborer un certain nombre de recommandations sur l'implémentation de l'imagerie motrice, sur les outils de mesures et d'inductions du stress, et sur la mise en place des interventions de coping précédemment décrites.

---

<sup>53</sup> La plupart de nos protocoles ont permis l'évaluation des traits de personnalité (études 1, 3, 4, 5, 6). Nous envisageons d'approfondir ces questions en étudiant les relations éventuelles entre personnalité et efficacité de la STCC seule ou bien couplée au VFC-RETRO. Les données de l'étude 3 nous permettraient d'apporter des éléments préliminaires de réponses à ces questions, cependant les tailles d'échantillons de nos groupes (n=20) restent relativement limitées pour attester ces associations.

### 3.3.1. Recommandations pour l'implémentation de l'imagerie motrice

Nos études ont montré que les capacités d'imagerie motrice explicites sont préservées pendant et après un événement stressant. Alors que l'imagerie motrice est majoritairement utilisée par des sportifs et des patients, d'autres champs disciplinaires pourraient en bénéficier tout autant afin d'améliorer les performances gestuelles et visuomotrices lors d'événements stressants (militaires, aviateurs, professionnels de santé) (Vine et al., 2016). Les applications potentielles de l'imagerie motrice par des professionnels de santé sont nombreuses (Hall, 2002). Une étude récente a ainsi montré qu'un entraînement par imagerie motrice explicite permettait de réduire le délai d'apprentissage de la mise en place d'une voie veineuse périphérique (Collet et al., 2020). Ces résultats confirment l'efficacité de l'imagerie motrice pour l'acquisition et le perfectionnement de gestes techniques médicaux préalablement évoquée dans plusieurs travaux (Bathalon et al., 2005; Davison et al., 2017; Sevdalis et al., 2014; Vignes et al., 2013). Hall et al. (2002) ont également proposé d'utiliser le travail d'imagerie lors des phases de préparation de procédures médicales complexes. Ces périodes constituent une source importante de stress pour le praticien, qui peut affecter la qualité de ses interventions (Arora et al., 2010; Rieger et al., 2014). Par ailleurs, le maintien des capacités d'imagerie explicite durant un événement stressant permet de postuler qu'il y aurait un maintien des bénéfices que peut induire l'imagerie (e.g. perfectionnement de gestes techniques) (Guillot et Collet, 2010). Nous proposerons que l'imagerie motrice explicite, pourrait être utilisée durant les phases préparatoires d'une réalisation d'une procédure technique (e.g. chirurgie), comme c'est déjà très utilisé par les pilotes d'avion de chasse (la patrouille de France). Cette hypothèse nécessite cependant des validations expérimentales pour mieux maîtriser les tenants et aboutissants de ces programmes de travail mental.

### 3.3.2. Recommandations pour les études sur le stress

#### 3.3.2.1. *Efficacité et limites des protocoles d'induction du stress*

Les procédures d'induction du stress qui présentent un volet psychologique nécessitent un jeu de rôle pour les expérimentateurs. Dans les stressseurs validés tels que le *TSSST* ou le *SECPT*, le comportement des expérimentateurs doit être standardisé au maximum (neutre ou froid). En effet, le comportement, l'expertise ou encore l'habit de l'expérimentateur sont des

modérateurs de l'efficacité de l'induction du stress (Gerin, 2010)<sup>54</sup>. Dès lors, les inductions de stress pourraient être dépendantes de la qualité du jeu de rôle. Ainsi, le *TSAS*, développé durant cette thèse afin d'induire spécifiquement un stress d'anticipation, pourrait être sensible aux habiletés individuelles des expérimentateurs à endosser le rôle d'un personnage froid et intimidé par ses supérieurs hiérarchiques. Nous avons utilisé le *TSAS* dans deux études indépendantes en laboratoire. Dans l'étude 3, un seul individu endossait le rôle du personnage froid, ce qui ne permettait pas d'examiner la validité inter-examineur. Dans l'étude 4, le protocole a permis l'implication de 3 expérimentateurs différents endossant ce rôle. Nos résultats ne montrent pas de modifications des niveaux de stress d'anticipation en fonction des expérimentateurs, témoignant ainsi de la reproductibilité inter-examineur de la procédure (étude 4, EVA-stress post *TSAT* en fonction de l'expérimentateur :  $\chi^2(77) = 0.25$ ,  $p = 0.778$ ).

De manière similaire, dans l'étude 2, nous avons mis en place un stresser psychologique basé sur une évaluation sociale. Ce stresser impliquait un expérimentateur principal qui donnait les instructions aux participants et un expérimentateur secondaire qui jouait le rôle du jury ou du stagiaire. Ce stresser présentait les caractéristiques reconnues pour induire un stress important, avec imprévisibilité, incontrôlabilité et menace de l'égo (Dickerson et Kemeny, 2004). Contrairement au *TSST*, il présentait l'avantage de pouvoir tester les participants sur une tâche cognitivo-motrice durant, et non après, un événement stressant. Dans ce stresser, deux personnes ont endossé le rôle de l'expérimentateur principal et deux autres le rôle du jury. Encore une fois, aucune différence dans les niveaux de stress n'a été observée (données personnelles). Les expérimentateurs présentaient des profils relativement variés (Bac +1 à +7, 5 femmes/1 homme âgés de 19 à 31 ans, caucasiens/hispaniques/indiens). Le fait que ces différents profils aient réussi à induire un stress similaire permet de postuler que la procédure décrite est reproductible. Afin de faciliter la standardisation de ce protocole, nos procédures étaient scriptées et apprises en amont, c'est-à-dire que tous les expérimentateurs apprenaient leurs discours à la manière d'une pièce de théâtre.

En termes de recommandations, nos études confirment l'importance de standardiser les attitudes et discours des expérimentateurs (Gerin, 2010). Nous invitons les futures études à

---

<sup>54</sup> Dans nos études les expérimentateurs du groupe stress portaient systématiquement des vestes de costumes.

mieux décrire leur protocole d'induction, tout particulièrement lorsque celui-ci s'écarte des stressseurs validés par la littérature, et d'apporter le détail des scripts utilisés au sein des annexes des publications, afin de faciliter la reproductibilité inter et intra expérimentateurs.

### 3.3.2.2. *Caractérisation plus fine des processus émotionnels*

Les mesures subjectives ne peuvent s'affranchir complètement d'un biais de désirabilité sociale. Les biais, appelés aussi effets de demande ou biais d'acquiescement, s'observent notamment lorsqu'un participant cherche à satisfaire les attentes de l'expérimentateur (Gilet, 2008). Dans la plupart des protocoles, le même expérimentateur annonce l'événement stressant et accompagne le participant dans les réponses aux questions. Il est possible qu'un tel rapport participant/expérimentateur facilite l'émergence des effets de demandes. Nous proposons qu'en complément de ces mesures autoévaluées, un expérimentateur sans aucun lien avec le participant réalise des entretiens semi-dirigés, de type explicitation (Vermesch, 2019), afin d'approfondir et fragmenter la description du vécu (cognitif, émotionnel, procédural) du participant au cours de l'expérience. Ces entretiens, mis en place en fin d'expérimentation, permettraient d'identifier les moments clés et de déterminer les éléments situationnels externes ou internes responsables de l'apparition du stress <sup>55</sup>. Alors que les questionnaires subjectifs, tels que l'EVA stress, caractérisent les niveaux de stress à un instant donné, les entretiens offrent une analyse plus globale. Ce sont donc des outils pertinents pour limiter les problématiques liées à la segmentation temporelle des questionnaires. Enfin, ces entretiens permettraient aux participants de faire l'expérience d'un moment d'introspection et faciliteraient une forme de métacognition <sup>56</sup>. Cette introspection pourrait les aider à réévaluer la situation et les niveaux de ressources disponibles à posteriori, ou encore à élaborer de futures stratégies de coping adaptées.

### 3.3.2.3. *Caractérisation plus fine des processus physiologiques*

En plus de l'évaluation subjective du stress, il reste primordial de caractériser les réponses de stress par des biomarqueurs de l'activité des axes HHAC et SSAM. Alors que nos techniques de coping ont montré une augmentation de la VFC et une diminution des marqueurs subjectifs

---

<sup>55</sup> Lors de notre étude 2, nous avons mis en place des entretiens d'explications qui nous ont permis d'identifier les éléments stressants spécifiques et individuels. Pour certains individus, le stressseur le plus intense était l'épreuve de calcul mental, alors que pour d'autres il s'agissait de l'évaluation négative perçue via les soupirs de l'expérimentateur, pendant les tâches d'imageries.

<sup>56</sup> Le terme de « métacognition » fait référence au fait d'avoir une activité mentale d'analyse ou de réflexion sur ses propres processus mentaux.

du stress, aucune de nos interventions n'a montré de modification des sécrétions de cortisol (étude 4). Ainsi, nos résultats ne confirment pas les données mise en avant par certaines études qui montraient une diminution des sécrétions de cortisol suite à une STCC ou la pratique de VFC-RETRO (Antal et al., 2014; Robinson, 2019). Nous avons comparé l'effet des groupes interventionnels sur les niveaux d'activation de l'axe HHAC (études 1, 4). Cependant, les futures études pourraient bénéficier d'une analyse plus approfondie des données issues des dosages de cortisol. En effet, de nombreux travaux catégorisent le profil des participants comme étant haut répondeurs (augmentation importante de cortisol) ou non répondeurs (pas ou très peu d'augmentation) (Kirschbaum et al., 1995; Pruessner et al., 2008; Quaedflieg et al., 2015). Ce type d'analyse pourrait aider à déterminer à posteriori l'efficacité des techniques. Lors d'un protocole similaire aux nôtres (intervention de coping suivie d'un évènement stressant), nous supposons que les individus réceptifs aux techniques de gestion émotionnelles, présenteraient un niveau d'activation de l'axe HHAC plus bas, et donc moins d'augmentation en cortisol que les individus non-réceptifs.

#### 3.3.2.4. *Caractérisation plus fine des processus de coping*

Dans nos études, nous nous sommes intéressés à des stressseurs qui faisaient l'objet de peu de préparation préalable spécifique (simulation haute-fidélité), ou même d'une absence de préparation du fait du caractère inattendu de l'évènement stressant (*SECPT*, *TSST*). Dans le cas d'annonce d'un évènement stressant qui doit survenir après quelques jours, semaines, ou mois, les individus peuvent se tourner vers différentes stratégies de coping préventives. Au sein de nos protocoles, nous avons identifié les stratégies mises en place de manière régulière par le biais des questions préalables aux participants sur le type de techniques émotionnelles pratiquées (yoga, sophrologie, méditation etc.) et le temps de pratique par mois (études 4, 6). Toutefois, nous n'avons pas récolté ces informations à l'aide de questionnaires validés. Afin de discriminer les effets spécifiques des stratégies de coping proposées au sein d'expérimentation de celles mises en place spontanément par les individus, il nous paraît essentiel de prendre en compte les stratégies et capacités de copings individuelles. À ce jour, plusieurs outils validés en français permettent de définir les techniques mises en places (*Brief Cope Scale*, Muller et Spitz, 2003) ou d'évaluer les capacités individuelles à modifier une stratégie de coping non efficace (*Coping Flexibility Scale*, Traber et al., 2020). Les futures

études, notamment celles qui s'intéressent à la caractérisation des événements stressants avec des anticipations de longues durées, bénéficieraient sans aucun doute de ces outils.

### 3.3.2.5. *Caractérisation plus fine des processus cognitifs*

L'ensemble de nos travaux ont mis en évidence des effets contrastés du stress sur les performances et bien que la littérature ait montré de manière répétée que le stress impactait négativement les performances exécutives (Shields et al., 2016), notre étude 4 n'a pas montré de détérioration de performance lors des tâches de flexibilité, d'inhibition, et de mémoire de travail suite au TSST. D'une part, il est possible que l'absence de détérioration des performances exécutives résulte d'un effet apprentissage (étude 4). En effet, les participants avaient tous réalisé le même ensemble de tâches cognitives environ 10 jours avant le re-test. La répétition de la tâche pourrait donc expliquer, tout au moins partiellement, l'absence d'effets du stress. D'autre part, il est possible que cette absence provienne du fait que nous nous sommes attachés à l'analyse de la performance et non à l'efficacité.

**Performance versus efficacité.** L'efficacité fait référence à la relation entre la performance (i.e. temps de réaction, nombre d'erreurs) et l'effort ou les ressources investies dans l'exécution de la tâche. L'efficacité diminue au fur et à mesure que des ressources sont dépensées pour atteindre un niveau de performance donné. Selon la théorie de l'efficacité du traitement, il est attendu que le stress affecte davantage l'efficacité du traitement de la tâche, c'est à dire le niveau d'énergie alloué pour la réaliser correctement, que la performance (Eysenck et al., 2007). Ainsi, les futures études devraient bénéficier d'une caractérisation approfondie des efforts nécessaires pour la réalisation des tâches durant un événement stressant. La caractérisation des efforts nécessaires peut se réaliser à l'aide des échelles subjectives estimant l'effort dépensé (EVA) ou la fatigue post-tâche (échelle de Borg ; *Rate of Perceived Exertion* de 6 à 20, Borg 1982), ou encore à l'aide de mesures objectives (dépense énergétique).

**Métaphore de la roulette.** Durant cette thèse, nous avons souligné à plusieurs reprises les interactions complexes et multifactorielles entre performance et stress. Carmen Sandi (2013) a illustré cette complexité à l'aide de la métaphore de la roulette qui illustre les différentes possibilités de combinaisons entre des conditions de stress spécifiques et le traitement



cognitif (Annexe 13). Nous proposons une actualisation de ce concept, avec les modifications suivantes (Fig. 62) :

1. **Tâche.** Alors que Sandi applique ce concept afin d'expliquer l'impact du stress sur les performances mnésiques, nous proposons de le généraliser à différents types de performances. Chaque tâche est caractérisée par sa nature (e.g. cognitive, motrice, implicite, explicite), son niveau de difficulté, ou encore la temporalité de réalisation vis-à-vis du stressé. Nos résultats montrent que les effets du stress sont spécifiques aux tâches : le stress est plus à même de détériorer une tâche cognitivo-motrice implicite qu'explicite (études 1, 2). La littérature montre que le niveau de complexité de la tâche, ainsi que son moment de réalisation, sont également des facteurs importants à prendre en compte (Shields et al., 2016; Vine et al., 2016).
2. **Stresseur.** Nous préférons le terme de stressé à celui de stress initialement proposé. Pour rappel, nous avons différencié les stressés (i.e. modification environnementale) de la réponse psychophysiological (i.e. stress).
3. **Individu.** Nous proposons d'ajouter au modèle la prise en compte des caractéristiques individuelles comme les traits psychométriques stables tels que les traits d'anxiété et de personnalité (étude 7) qui, étaient des facteurs manquant à l'illustration de ces interrelations. Les individus peuvent être différenciés par leur expérience vis-à-vis du stressé (novice : 1<sup>ère</sup> confrontation avec le stressé). Les individus peuvent aussi être caractérisés par leur préparation. Par exemple, ils peuvent mettre en place différentes stratégies préventives de gestion du stress. Nos résultats ont montré de manière répétée que le VFC-RETRO et la respiration ont aidé les individus à se sentir plus performants (étude 3, 4, 5, 6).

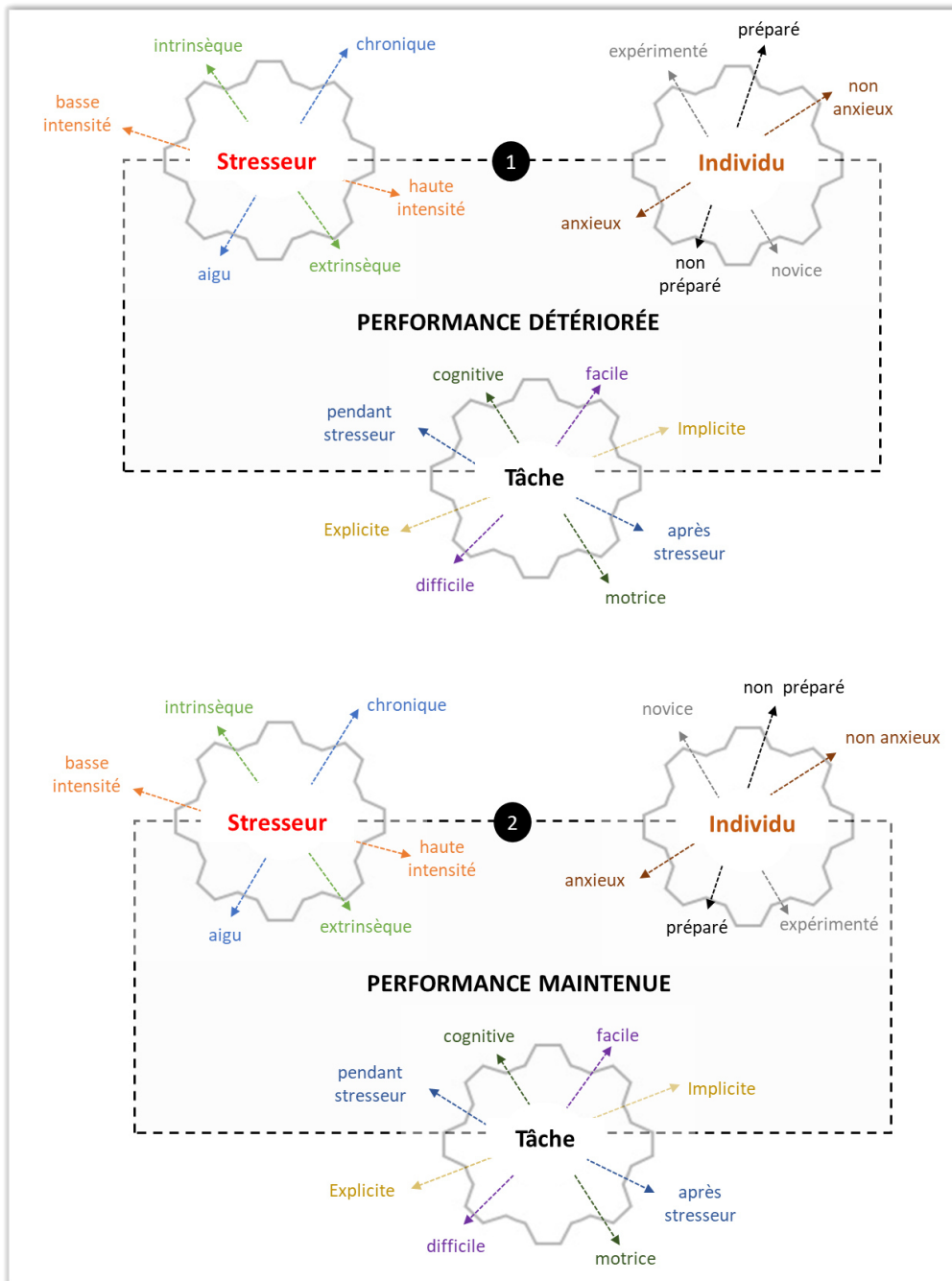


Figure 62. Modèle multifactoriel de la performance relatif aux caractéristiques du stressueur et aux spécificités individuelles. Les effets du stress sur la performance sont dépendants d'une interaction complexe entre les caractéristiques du stressueur, de l'individu, et de la tâche. (1) Exemple de configuration où la performance est détériorée. (2) Pour un même stressueur et une même tâche, la performance peut être maintenue en fonction des caractéristiques de l'individu (e.g. préparé : mise en place d'une stratégie de coping préventive ; expérimenté : rencontre préalable avec ce stressueur). Ainsi, il existe une multitude d'associations possibles et la performance finale sera la résultante d'une combinaison de chacun des pôles des axes *stressueur*, *individu* et *performance*.

### 3.3.3. Recommandations pour l'implémentation des techniques de coping

#### 3.3.3.1. *Avantages des interventions courtes*

Les premières études s'intéressant aux impacts du VFC-RETRO dans un contexte de stress et d'anxiété avaient opté pour des protocoles avec des interventions répétées (en moyenne 11 sessions) (Goessl et al., 2017). Les sessions répétées peuvent toutefois souffrir d'un manque d'adhésion des participants, pouvant aller jusqu'au retrait des protocoles expérimentaux. Les quelques études portant sur des interventions en session unique ont exploré des interventions de 23 minutes en moyenne (de 15 à 60 min), donc relativement longues (Mikosch et al., 2010; Prinsloo et al., 2013, 2011; Sherlin et al., 2010, 2009; Wells et al., 2012). Etant donné que des sessions longues peuvent induire de la fatigue, du désintérêt, et de la lassitude, déterminer les effets d'interventions courtes est devenu primordial pour mettre en place des interventions efficaces et ajustées aux contraintes temporelles de terrain.

Nous avons montré qu'une intervention de 15 minutes de VFC-RETRO, seule ou couplée à la STCC, permettait une réduction de différents marqueurs du stress (études 3, 4). Ensuite, nous avons montré pour la première fois qu'une intervention de VFC-RETRO ultracourte - 5 minutes seulement - apportait des effets bénéfiques similaires sur les marqueurs psychophysiologiques du stress (études 5, 6). Alors qu'un VFC-RETRO court ou ultracourt permet de diminuer le stress de façon comparable, la durée de l'intervention semble affecter différemment les niveaux d'activations. Nos résultats indiquent qu'une intervention de 15 minutes engendrait un état de relâchement, toutefois une intervention de 5 minutes permettait d'augmenter la relaxation sans affecter les niveaux d'activation et d'énergie. Ainsi, les interventions courtes pourraient éviter toute désactivation inappropriée sans affecter l'efficacité du VFC-RETRO sur les marqueurs psychophysiologiques du stress.

Il est attendu qu'un état détendu tout en restant activé soit optimal durant des situations stressantes où un haut niveau de performance est attendu (e.g. compétition sportive, examen classifiant, soins d'urgences). En effet, il existe une relation complexe et non-linéaire entre niveau d'activation, anxiété et performance (voir page 176, Fig. 49). Un niveau d'activation élevé associé à un bas niveau de stress serait la combinaison la plus adéquate pour être performant (Delignières, 1993). Ces données confirment le challenge, souvent recherché dans le sport, d'une exigence paradoxale entre l'augmentation de l'activation physiologique permettant de faire face à la situation, et le relâchement permettant la fluidité des

mouvements (Guillot et al., 2003). Enfin, le fait de consacrer un temps aussi court à la remédiation pourrait permettre d'appliquer d'autres techniques complémentaires telles que la mise en place de stratégies actives axées sur le problème. Par exemple, suite à 5 minutes de respiration ou de VFC-RETRO seul ou en groupe, les professionnels de santé pourraient mettre en place des stratégies de planification d'équipe ou élaborer une liste de contrôles des ressources juste avant la prise en charge de la situation stressante. Ces approches sont actuellement mises en place dans les formations de pilotage pour tous les personnels de bord.

### 3.3.3.2. *Définir la durée de pratique des techniques de coping*

À notre connaissance, aucune étude n'a cherché à caractériser l'impact instantané des pratiques de gestion émotionnelles sur les scores de cohérence cardiaque durant un stress d'anticipation. La durée optimale d'une session de VFC-RETRO restait inconnue et souvent déterminée de manière empirique. Contrôler cette durée est cependant de première nécessité afin d'implémenter des interventions de terrain efficaces. La figure 63, nous indique que les conditions contrôles (visionnage d'une vidéo neutre, lecture d'examen biologique normal) et STCC (anodale PFCdl) ont permis une atteinte rapide d'un plateau de cohérence cardiaque bas et relativement stable. Pour ces conditions, on observe également une légère augmentation de la cohérence au bout de la 13<sup>ème</sup> minute, qui pourrait résulter d'une détente autogénérée par l'individu. En effet, dans nos études 3 et 4, nous observons un effet temps qui montre que quelle que soit l'intervention, on observe une diminution des ressentis de stress et de tension, et une augmentation de la relaxation durant ces 15 minutes.

Les trois autres interventions, respiration, VFC-RETRO et VFC-RETRO couplé à la STCC ont permis d'obtenir des scores de cohérence élevés. Nos données montrent qu'une session de VFC-RETRO inférieure à 2 minutes ne permettrait pas d'atteindre un plateau de cohérence. Ainsi, nous suggérons d'appliquer un VFC-RETRO au moins pendant 2 minutes consécutives. Par ailleurs, les participants du groupe VFC-RETRO ont rapporté qu'une douzaine de minutes d'intervention leur semblait suffisante en vue de se préparer à un événement stressant (étude 3). Peut-être que cette durée permettrait de prévenir d'une trop grande lassitude et de limiter la désactivation observée suite à 15 minutes de pratique (étude 4) ; ces hypothèses restent à valider expérimentalement. Sur l'étude de terrain (étude 6), durant laquelle seulement 5 minutes d'intervention étaient proposées, nous avons observé une augmentation de la cohérence cardiaque plus importante dans le groupe RESPI + RETRO que RESPI. Ainsi, la pratique

du VFC-RETRO potentialise les effets de la respiration sur les scores de cohérence cardiaque, et ce dès la troisième minute de pratique. Enfin, l'ajout de la STCC semble induire une légère potentialisation des effets du VFC-RETRO ; cet effet semble particulièrement marqué de la 7<sup>ème</sup> à la 11<sup>ème</sup> minutes (étude 4). Ensemble, nos résultats montrent que des applications de courtes durées, comprises entre 2 et 11 minutes, bénéficient d'un couplage multi-interventionnel.

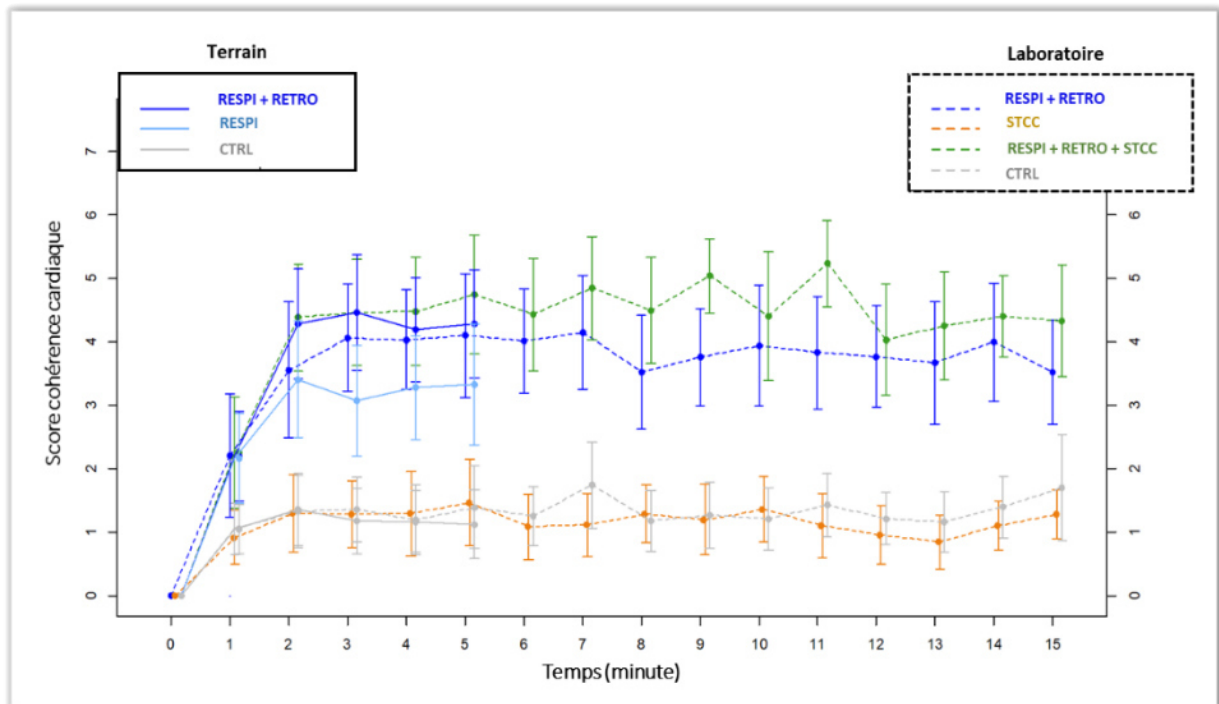


Figure 63. Évolution des scores de cohérence cardiaque instantanés durant un stress d'anticipation (terrain : anticipation d'un stress professionnel, laboratoire : anticipation du *Trier Social Stress Test*). Les scores de cohérence cardiaques ont été enregistrés et calculés via un enregistrement à 370 Hz de l'activité cardiaque. STCC : stimulation anodale transcrânienne à courant continu du cortex préfrontal dorsolatéral. RESPI : respiration relaxante standardisée à 6 cycles par minute. RETRO : technique de rétrocontrôle biologique basée sur la variabilité de la fréquence cardiaque. Les interventions ont été appliquées soit pendant le *Trier Social Anticipatory Stress test* durant 5 minutes dans les études de laboratoire (CTRL : vidéo, STCC, RESPI + RETRO, RESPI + RETRO + STCC), soit pour une durée de 5 minutes pendant l'anticipation d'un évènement de soins critiques par un professionnel de santé dans les études de terrain (CTRL : lecture, RESPI, RESPI + RETRO). Les applications de coping comprises entre 2 et 11 minutes bénéficient d'un couplage multi-interventionnel.

**Familiarisation et expertise.** Dans les études de laboratoires nous n'avons pas réalisé de familiarisation avec les techniques de gestion émotionnelles (études 3, 4). A l'inverse, dans les études de terrains, nous avons proposé un apport théorique bref ainsi que 30 secondes de respiration relaxante (études 5, 6, 7). La figure 63, montre que les plateaux d'atteinte du VFC-RETRO des groupes laboratoire et terrain sont similaires, ce qui suggère qu'une courte phase de familiarisation à la respiration ne module pas les scores de cohérence et ne serait pas indispensable. Dorénavant, il nous apparaît intéressant de déterminer si une expertise au VFC-RETRO, acquise via des sessions répétées, permettrait de modifier les vitesses d'acquisition

et/ou les hauteurs des plateaux de cohérence observés. Il semble probable que des entraînements préalables permettraient d'atteindre des plateaux de cohérence plus hauts, auquel cas les procédures devraient être individualisées en fonction du niveau d'expertise (e.g. mise en place de sessions plus longues pour les novices que les experts).

### 3.3.3.3. *Applications du VFC-RETRO*

Le VFC-RETRO est facile et rapide à mettre en place et il existe aujourd'hui des dispositifs transportables, compacts et compatibles avec des téléphones portables (Jonathan et al., 2018)<sup>57</sup>. Ces dispositifs peu coûteux permettent une pratique autonome et ambulatoire. Si l'efficacité de ces dispositifs est largement vantée par les médias ou certains praticiens, leur efficacité restait à être démontrée expérimentalement. Nos études ont démontré de manière répétée et indépendante l'impact positif de la pratique du VFC-RETRO sur la diminution des marqueurs psychophysiologiques du stress (études 3, 4, 5, 6). Ces effets positifs du VFC-RETRO durant un stress d'anticipation ont été observés et répliqués à la fois dans nos études sur le stress généré en laboratoire (étude 3, 4) et dans celles sur le stress professionnel médical (études 5, 6). Nos résultats soulignent ainsi l'applicabilité et l'efficacité de cette technique dans différents contextes générateurs de stress. Ces résultats présentent une avancée majeure pour l'implémentation du VFC-RETRO et une validation expérimentale solide et reproductible. Cette pratique peut s'implémenter dans de nombreuses situations de crise où les contraintes temporelles sont importantes et/ou avec un stress d'anticipation élevé. Ainsi, dans un cadre militaire, la pratique de 5 min de VFC-RETRO par les soldats et officiers se destinant à des situations opérationnelles concrètes semble réalisable. Dans des situations civiles telles qu'un entretien d'embauche, une opération chirurgicale (Mikosch et al., 2010), ou une compétition sportive, les individus pourraient tout aussi facilement réaliser un exercice de VFC-RETRO à leur domicile ou sur leur lieu de travail. Alors que des sessions répétées de VFC-RETRO ont déjà fait leurs preuves pour diminuer le stress de manière aspécifique chez des athlètes et entraîneurs (Jiménez Morgan et Molina Mora, 2017), nos résultats démontrent l'efficacité d'une seule session de VFC-RETRO pour se préparer à un événement spécifique comme, par exemple, une compétition.

---

<sup>57</sup> Emwave, stresseraser, urgowave, il existe aussi des applications sur les montres cardiofréquencesmètres (e.g. application Serene sur montre polar grit)

Un moyen connu pour potentialiser les effets de la pratique du VFC-RETRO est de déterminer en amont la fréquence respiratoire de résonance individuelle (Lehrer et al., 2000)<sup>58</sup>. Vaschillo (1984) a découvert que la fréquence de résonance cardiaque exacte diffère d'une personne à l'autre et peut changer au cours du temps chez un même individu. Lehrer et son équipe ont alors proposé de déterminer en amont la fréquence respiratoire individuelle provoquant la plus grande amplitude d'arythmie sinusale respiratoire, appelée fréquence de résonance personnelle (2000). Le protocole de Lehrer est constitué de plusieurs étapes. Au cours de la première séance, l'individu apprend à produire des oscillations de la fréquence cardiaque maximales. Pour cela, la personne respire à des fréquences spécifiques, comprises entre 4 et 7 cpm, les amplitudes des oscillations de la fréquence cardiaque sont enregistrées et présentées via une interface visuelle. Au cours des séances suivantes, l'individu reçoit un VFC-RETRO avec l'instruction de respirer selon la fréquence de résonance précédemment identifiée. La détermination de la fréquence de résonance personnelle, quoique relativement chronophage et donc difficilement applicable dans des conditions où les contraintes temporelles sont importantes, nous semble particulièrement intéressante dans les applications répétées de VFC-RETRO.

#### 3.3.3.4. *Applications du VFC-RETRO couplé à la STCC*

Nos résultats montrent que le VFC-RETRO couplé à la STCC est l'alternative qui contribue à la plus grande diminution du stress psychophysologique. Malgré le fait que certains dispositifs de STCC transportables soient disponibles sur le marché<sup>59</sup>, nous conseillons que la STCC soit plutôt, tout au moins dans un premier temps, appliquée dans un contexte médicalisé. En effet, la STCC nécessite un certain niveau d'expertise (respect des contre-indications, préparation du cuir chevelu, identification des zones cérébrales, montage du bonnet de stimulation). Une grande partie des traitements actuels du stress chronique repose sur une prise en charge médicamenteuse, cependant, ces traitements peuvent entraîner des effets secondaires et/ou des résistances. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles

---

<sup>58</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : respiration standardisée lente.

<sup>59</sup> Il existe plusieurs dispositifs non-médicaux, ambulatoires, présentés la majorité du temps sous forme de bandeaux de stimulation. Exemples : [https://hitek.fr/actualite/cefaly-bandeau-neurostimulateur-migraine-soin\\_2093](https://hitek.fr/actualite/cefaly-bandeau-neurostimulateur-migraine-soin_2093), <https://huby-innovation.com/boutique-crowdfunding/tech-multimedia/neorhythm-bandeau-intelligent-neurostimulation/>. Ces outils sont promus dans un cadre thérapeutique contre certaines pathologies comme les migraines, les douleurs chroniques, les troubles du sommeil, la gestion du stress... cependant la précision de la zone stimulée peut être questionnée.

approches thérapeutiques non-invasives adaptées. Une étude précédente a montré que la STCC est compatible avec la prise en charge de patients psychotiques pharmaco-résistants (Li et al., 2019). Ainsi, l'approche combinée ouvre des perspectives d'application particulièrement prometteuses pour le traitement des pathologies chroniques associées au stress où les symptômes psychophysiologiques sont conséquents (stress post-traumatique, dépression, anxiété généralisée). De futures études devront certainement démontrer les effets sur le long terme, avec des applications répétées du VFC-RETRO + STCC chez ces populations.

#### 3.3.3.5. *Définir le meilleur moment d'implémentation des techniques de coping*

Définir le moment d'implémentation des interventions est primordial pour proposer des interventions ajustées aux besoins individuels et aux contraintes de terrains. Les techniques de coping peuvent être pratiquées de façon régulière dans le cadre d'une prévention générale (programme d'apprentissage de la gestion du stress), ou implémentées de manière spécifique en amont, en aval, ou durant une situation stressante. Nos résultats mettent en évidence l'intérêt de pratiquer la respiration relaxante et le VFC-RETRO seul ou couplé avec la STCC durant l'anticipation d'un évènement stressant. Le choix de l'intervention (VFC seule ou couplé avec la STCC) réside dans l'aspect performanciel attendu ou non durant l'évènement stressant. Alors que des interventions de courtes durées sont gages de faisabilité en pratique réelle durant un évènement stressant, des interventions longues apparaissent pour leurs parts plus adéquates après l'évènement stressant afin d'optimiser les processus de récupération. Enfin, des interventions répétées semblent adaptées dans le cadre d'une prévention générale ou d'un traitement du stress chronique et de ses troubles associés (Fig. 64).



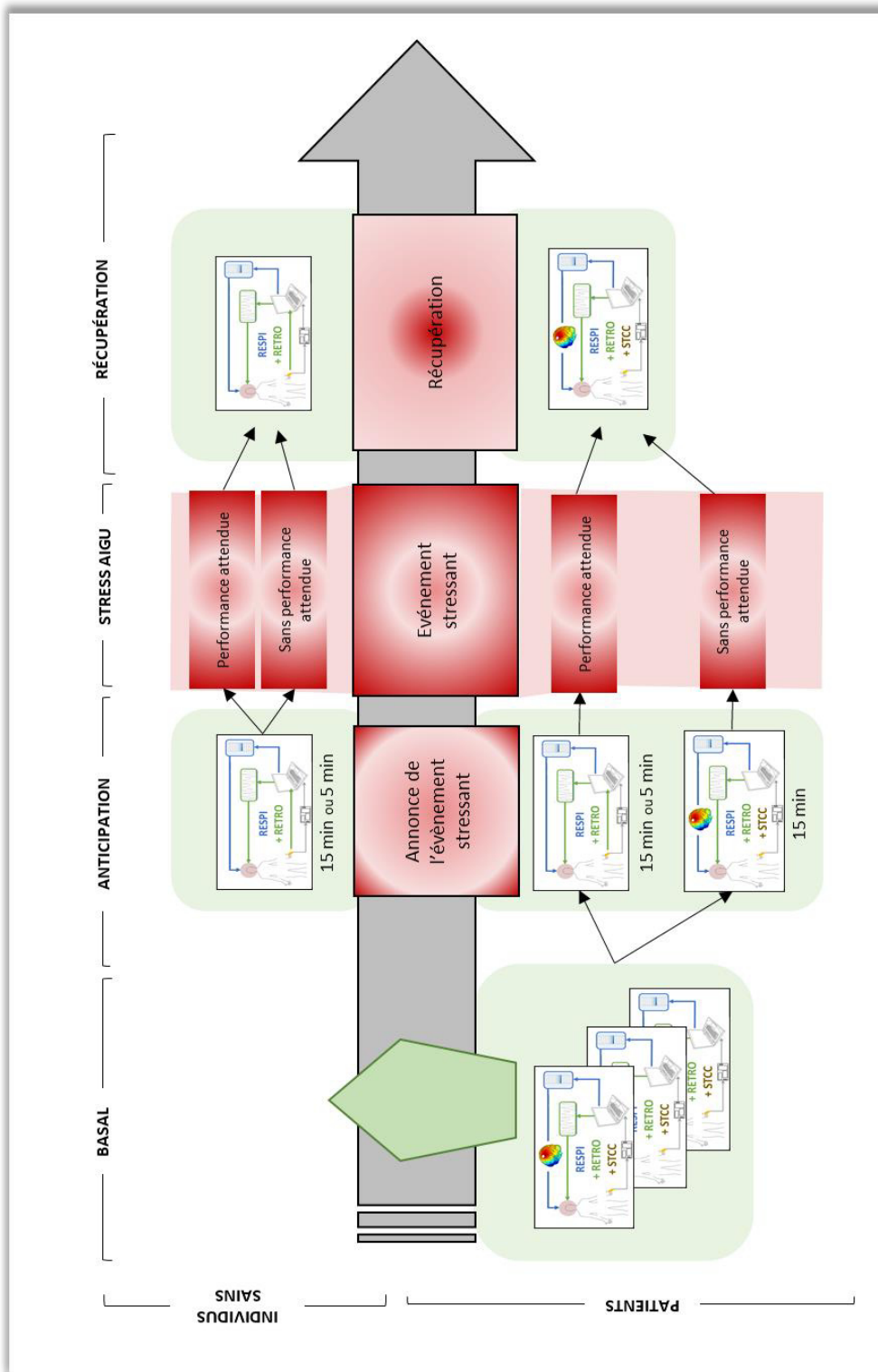


Figure 64. Conseils d'implémentation des techniques de coping à différents temps pour des individus sains et des patients présentant des pathologies associées au stress (e.g. : dépression, syndrome de stress post-traumatique, anxiété généralisée, burnout). Les bénéfices des interventions courtes (15 min) et ultracourtes (5 min) durant la période d'anticipation ont été démontrés durant cette thèse. La respiration couplée au VFC-RETRO est l'intervention la plus adéquate en vue de maintenir un bon niveau de performance durant ou après un événement stressant, nous la conseillons donc en amont d'une situation où une performance est attendue (e.g. compétition). L'intervention qui couple respiration relaxante, VFC-RETRO et STCC est celle qui induit une plus grande diminution du stress psychophysiologique, ainsi nous la conseillons en amont et en aval de situations stressantes sans performance attendue (e.g. opération chirurgicale pour le patient). L'efficacité supposée des techniques en basal et en récupération attend dépendant de nouvelles validations expérimentales. STCC : stimulation anodale transcrânienne à courant continu du cortex préfrontal dorsolatéral. RESPI : respiration relaxante standardisée à 6 cycles par minute. RETRO : technique de rétrocontrôle biologique basée sur la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC-RETRO).

## 4. Conclusions

Dans le cadre de cette thèse nous avons cherché à mieux caractériser quand, comment, et pourquoi le stress apparaissait. Notre approche pluridisciplinaire s'est ancrée dans la continuité des travaux de ces dernières années, mettant en avant les impacts et moyens de remédiation du stress, ainsi que l'influence des caractéristiques individuelles. Le premier objectif de cette thèse était de déterminer l'impact du stress sur les capacités d'imagerie motrice (études 1, 2) (Fig. 65). Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'impact d'un stress aigu sur l'imagerie de type implicite et explicite. Notre première étude a montré une détérioration des capacités implicites et un maintien des capacités explicites d'imagerie motrice suite à un événement stressant. Notre seconde étude a confirmé le maintien des capacités d'imagerie explicite pendant un événement stressant. En outre, la simulation des mouvements réalisée consciemment/volontairement serait préservée, indépendamment du type et de la nature du stress (en amont *versus* pendant, physique *versus* social).

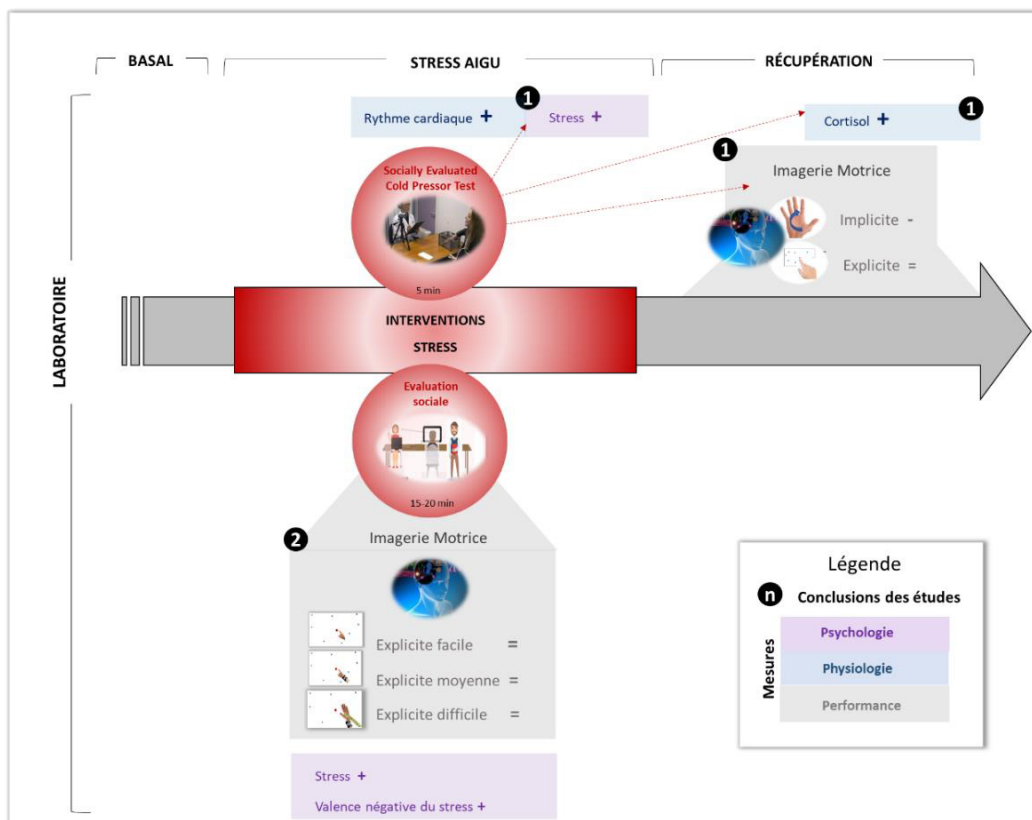


Figure 65. Effets du stress sur les capacités d'imagerie motrice implicite et explicite.

Le second objectif de notre travail était d'élaborer un outil méthodologique permettant d'induire un stress d'anticipation afin de mieux appréhender et caractériser cette période (étude 3). Le *Trier Social Anticipatory Stress* a permis l'induction d'une réponse psychophysiological, avec une augmentation du stress subjectif (EVA stress, REC) et objectif (diminution de la cohérence cardiaque). Cet outil nous paraît particulièrement pertinent et facile à utiliser tant dans les études de laboratoire que dans une perspective de recherche plus appliquée et écologique (e.g. préparation à un examen). Le troisième objectif était d'explorer des techniques de remédiation du stress aigu (études 3, 4, 5, 6). Pour cela nous avons comparé l'efficacité de 4 techniques de gestion émotionnelle : respiration relaxante, VFC-RETRO <sup>60</sup>, STCC anodale du CPFdl, et VFC-RETRO couplé à la STCC. Nous avons administré ces techniques au cours d'une seule session de 5 ou 15 minutes, durant un stress d'anticipation. Nos résultats ont montré que les interventions modulent de manière spécifique et différente les marqueurs psychologiques et physiologiques ainsi que les performances. Hormis la STCC, toutes les interventions testées se sont révélées efficaces pour réduire les marqueurs psychophysiologicals du stress, bien que leur degré d'efficacité reste variable (Fig. 66).

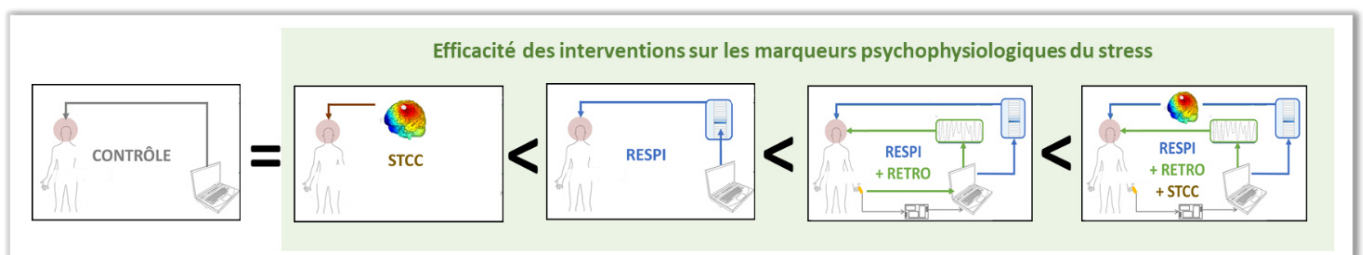


Figure 66. Efficacité comparative des interventions sur les marqueurs psychophysiologicals du stress. STCC : Stimulation anodale transcrânienne à courant continu sur le cortex préfrontal dorsolatéral. RESPI : respiration relaxante standardisée à 6 cycles par minute. RETRO : technique de rétrocontrôle biologique basé sur la variabilité de la fréquence cardiaque. Les interventions ont été appliquées pendant le *Trier Social Anticipatory Stress test* (15 minutes, CONTRÔLE : vidéo, STCC, RESPI + RETRO, RESPI + RETRO + STCC) ou pendant l'anticipation d'un évènement de soins critique par un professionnel de santé (5 minutes, CONTRÔLE : lecture, RESPI, RESPI + RETRO).

Comparativement à une condition contrôle, 5 minutes de respiration relaxante ont permis d'augmenter la relaxation subjective et objective (cohérence cardiaque) durant l'anticipation (études 5, 6). Lorsque la respiration était couplée à un VFC-RETRO, une augmentation significativement plus importante de ces deux marqueurs était observée (étude 6). Comparativement à une condition contrôle, 15 minutes de VFC-RETRO ont augmenté la VFC (cohérence cardiaque, SDRR, pNN50, LF/HF) et réduit le ressenti global de stress (VAS diminution) (études 3, 4). Un couplage du VFC-RETRO avec la STCC a permis de potentialiser les effets sur la VFC (LH/HF) et d'induire une relaxation immédiate et une réduction du stress

<sup>60</sup> Le VFC-RETRO était toujours combiné à un exercice de respiration relaxante dans nos études.

global plus importante (étude 4). Concernant les marqueurs de performances, nos résultats ont montré que la respiration seule ou couplée au VFC-RETRO permettait d'améliorer les ressentis subjectifs de performances réalisées pendant l'anticipation (étude 3), pendant l'événement stressant (étude 6), mais aussi après l'évènement stressant (étude 4). D'un point de vue quantitatif, certaines de nos études ont objectivé cette augmentation de performance (études 5, 4), alors que d'autres n'ont pas montré de différence par rapport au groupe contrôle (études 3,6).

Les résultats de nos travaux soulignent les effets bénéfiques de l'implémentation des techniques de gestions émotionnelles (VFC-RETRO + STCC > VFC-RETRO > RESPIRATION) à l'échelle du groupe (études 3, 4, 5, 6). Ces résultats permettent d'envisager la mise en place de techniques de remédiation du stress à grande échelle. Toutefois, les réponses de stress font l'objet de variabilités interindividuelles considérables qu'il convient de prendre en compte (Williams et al., 2010). Ainsi, le dernier objectif de cette thèse était d'évaluer l'impact des traits de personnalité sur la sensibilité au stress et l'efficacité des techniques de gestion émotionnelle (étude 7). Nous avons montré que les individus présentant un trait de névrosisme élevé étaient particulièrement sensibles au stress d'anticipation. Au contraire, les individus ayant des scores élevés en conscienciosité et en extraversion étaient peu sensibles au stress d'anticipation. Enfin, les techniques de respiration relaxante et de VFC-RETRO se sont révélées particulièrement efficaces chez des individus présentant un trait d'ouverture aux expériences élevé. Pris dans leur ensemble, les résultats de nos études expérimentales confirment l'intérêt d'appliquer des techniques de gestion émotionnelle brèves afin de prévenir les réponses psychophysiologiques et les détériorations cognitives habituellement observées lors d'événements stressants (Fig.67).

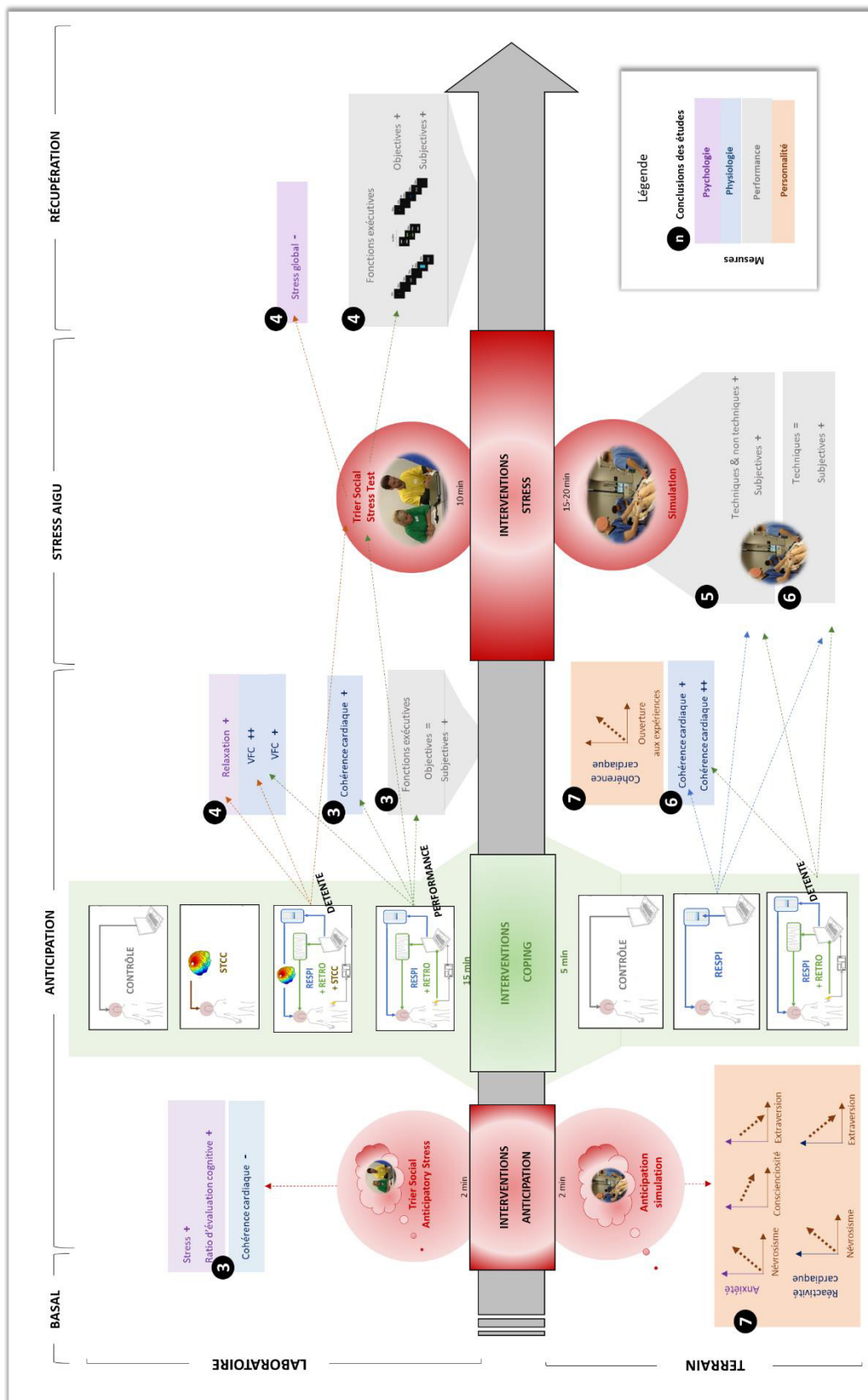


Figure 67. Effets du stress, des techniques de coping, et de la personnalité sur les marqueurs psychophysologiques et les performances.

## 5. Perspectives

### 5.1. *Étude perspective 1* : gestion du stress durant les examens

#### 5.1.1. Stratégies de coping post-événement stressant

Dans nos études, nous nous sommes principalement intéressés aux périodes d'anticipations de l'évènement stressant ainsi qu'à la situation stressante en elle-même. Il est toutefois important de prendre en compte les réponses psychophysiologiques qui suivent la situation stressante afin de caractériser les vitesses de récupération post-stress. En effet, dans de nombreuses situations, des informations importantes sont fournies aux individus suivant l'évènement stressant. Des bilans, appelés aussi débriefings, sont ainsi fréquemment mis en place après la gestion d'une situation stressante (Dahl, 2017; Lilot et al., 2018; Tuckey et Scott, 2014). Suite à l'exposition, les secouristes peuvent réaliser un bilan en vue de diminuer le stress ressenti et/ou dans le but d'explorer des pistes d'amélioration pour optimiser leurs prises en charge futures. Suite à une compétition sportive, le debriefing peut faire l'office de critiques techniques procédurales importantes et constructives.

Le stress pendant l'encodage perturbe l'apprentissage et la consolidation mnésique (Shields et al., 2017). Il est possible que ces déficits mnésiques soient consécutifs aux processus de rumination post-stress qui entraîneraient des déficits attentionnels tournés vers l'intéroception négative (Gianferante et al., 2014; Vinski et Watter, 2013). La rumination est un type de pensée persistante avec une tendance à penser aux causes et conséquences des problèmes. Son apparition est favorisée à la suite d'un stress aigu et dès lors, est caractérisée par des pensées négatives sur les causes et conséquences de ce stress. La rumination nuit à la résolution de problèmes et est associée à une augmentation des risques de dépressions et de troubles anxieux (Nolen-Hoeksema et al., 2008). De plus, nous supposons que la rumination négative post-événement pourrait augmenter le risque d'évaluer à posteriori ses ressources comme insuffisantes et donc augmenter le risque de juger un futur événement similaire comme menaçant (Vine et al., 2016).

Ainsi, afin de diminuer le stress résiduel et ses effets délétères associés (i.e. rumination, perturbation de l'encodage), certains outils de régulation émotionnelle sont proposés entre la fin de l'évènement stressant et le début du débriefing. Un essai randomisé a montré l'effet favorable de 5 minutes de relaxation (scan psychocorporel progressif, respiration relaxante, technique du lieu sûr) juste avant un débriefing de simulation en santé sur la mémorisation à

3 mois (Lilot et al., 2018). Des interventions post-événement stressant devraient permettre d'accélérer le retour aux valeurs basales des paramètres psychophysiologiques et diminuer la rumination, favorisant ainsi le maintien des capacités attentionnelles et mnésiques.

#### 5.1.2. Pistes pour de nouvelles techniques de coping

La méditation de pleine conscience (*mindfulness*) est de plus en plus fréquemment utilisée, tant par la population générale que dans le domaine médical hospitalier. Cette technique vise à apprendre aux pratiquants à prendre conscience des sensations de leur corps et de leurs pensées (Le Barbenchon et al., 2016). L'utilisation de programme de méditation de pleine conscience a montré une réduction de l'anxiété et une amélioration de la qualité de vie (Janssen et al., 2018; Laureys, 2019). Les étudiants en santé, exposés à une pression constante et à des situations cliniques difficiles, sont sujets au stress et présentent un risque élevé de syndrome d'épuisement professionnel, de troubles anxieux et de dépression (Abdulghani, 2008; Almojali et al., 2017; Cornwell et al., 2004; Ishak et al., 2013; Qamar Khadija et al., 2015; Saravanan et Wilks, 2014; Sherina et al., 2004). Pour cette population sensible, plusieurs protocoles de remédiation au stress, incluant la méditation de pleine conscience, ont montré leur efficacité sur la réduction des ruminations négatives, du stress et de l'anxiété, des symptômes dépressifs et du risque d'épuisement professionnel (Daya et Heath Hearn, 2018; Gallego et al., 2014; Janssen et al., 2018; Lavadera et al., 2020; Ratanasiripong et al., 2015; Song et Lindquist, 2015). Une formation de deux semaines à la méditation de pleine conscience s'avère également efficace pour améliorer les performances lors d'un examen d'entrée universitaire (i.e. exercices de lecture-compréhension et mémorisation immédiate) (Mrazek et al., 2013). Cependant, il n'a pas encore été établi si une session courte de méditation réalisée avant un examen permettrait, par la réduction des symptômes de stress, d'augmenter les performances des professionnels de santé lors d'un examen.

#### 5.1.3. ECOS, stress, coping et performance

Les Examens Cliniques à Objectifs Structurés (ECOS) sont une nouvelle méthode d'évaluation des compétences qui se base sur des exercices divers, rapides et successifs de simulations de soins cliniques à haut degré de réalisme. Ces examens évaluent les étudiants sur leurs compétences professionnelles. De par leur nature classante, les ECOS induisent un haut niveau de stress pour les étudiants, toutefois ce niveau de stress ne doit pas être trop important afin ne pas altérer les performances durant l'examen (Kim, 2016). Le VFC-RETRO a

déjà montré ses preuves dans la gestion préventive de divers événements stressants (Schlatter et al., 2021). La gestion du stress peut également être effectuée par des techniques basées sur une stimulation cognitive bienveillante et rassurante, dans le but de mobiliser pleinement les ressources cognitives disponibles. En effet, la confiance en soi est un marqueur psychologique qui va influencer de manière importante la gestion du stress et les performances qui en découlent (Lee-Flynn et al., 2011). La projection dans des phrases valorisantes ou des retours positifs des expérimentateurs permettraient d'améliorer la confiance en soi et la performance (Brooks et al., 2019). L'introspection, la méditation, la prise de conscience de l'environnement proche, de son corps, et de ses pensées, pourraient aussi aider à réduire l'impact du stress par un ancrage dans l'instant présent.

À notre connaissance, aucune recherche n'a encore comparé les effets de la pratique d'un VFC-RETRO ou d'un protocole de valorisation de l'estime de soi en amont ou en aval d'une situation stressante. Le but de cette future étude, que nous avons d'ores et déjà planifiée et structurée, sera de déterminer l'impact de ces techniques durant une situation de stress induit par la réalisation classifiante des ECOS<sup>61</sup>. Nous postulons que ces techniques, exécutées avant le début du circuit d'ECOS, pourraient diminuer le niveau de stress et améliorer les performances durant la simulation. Appliquées après l'évènement stressant, les techniques de coping pourraient diminuer la rumination négative.

L'ensemble des étudiants passant les ECOS pourront volontairement participer à l'expérience (n estimé = 300). Les étudiants devront remplir un questionnaire démographique ainsi que la *Brief Cope Scale* (Muller et Spitz, 2003). Ils seront ensuite répartis aléatoirement dans 3 groupes : VFC-RETRO, STIMULATION PSYCHOLOGIQUE, OU CONTROLE en fonction de leur intervention pré-ECOS (Fig. 68). Les participants du groupe CONTROLE pourront réaliser une activité libre silencieuse de leur choix. Toutes les interventions dureront 6 minutes. L'évolution de l'état psychologique sera mesurée en amont des interventions, ainsi qu'en amont et en aval des ECOS (EVA stress, REC, AD-ACL). Après les ECOS, une deuxième intervention sera

---

<sup>61</sup> La méthode d'Examens Cliniques Objectifs Structurés (ECOS) est un format d'évaluation des compétences basé sur la simulation haute-fidélité de situation clinique. Développé par le Pr R.M. Harden en 1975, les ECOS naissent de la nécessité d'avoir de nouveaux outils performants pour évaluer l'ensemble du spectre des compétences requises pour les apprenants en sciences médicales, à savoir les compétences cognitives, techniques et comportementales. Pour ces raisons, les ECOS, déjà utilisés comme standard d'évaluation dans de nombreux pays, s'imposent comme une nouvelle approche docimologique incontournable pour l'évaluation des étudiants de médecine en France (Carraccio et Englander 2000, Turner et Dankoski 2008, Casey et al 2009). En pratique les ECOS correspondent à un examen séquentiel et minuté constitué d'un circuit pour l'étudiant où se succèdent plusieurs ateliers rapides (stations) au cours desquels sont simulés des situations cliniques avec un haut niveau de fidélité (interrogatoire spécifique, examen clinique orientée, geste technique médical).



proposée, les groupes VFC-RETRO et STIMULATION PSYCHOLOGIQUE seront suivis de 6 minutes d'activité libre. Le groupe CONTROLE sera soit suivi de 6 minutes d'activité libre soit de 6 minutes de VFC-RETRO, afin de déterminer l'impact de cette intervention sur la rumination et la récupération post stress. La VFC (cohérence cardiaque, SDRR, RMSSD) sera mesurée pendant les interventions pré et post ECOS.

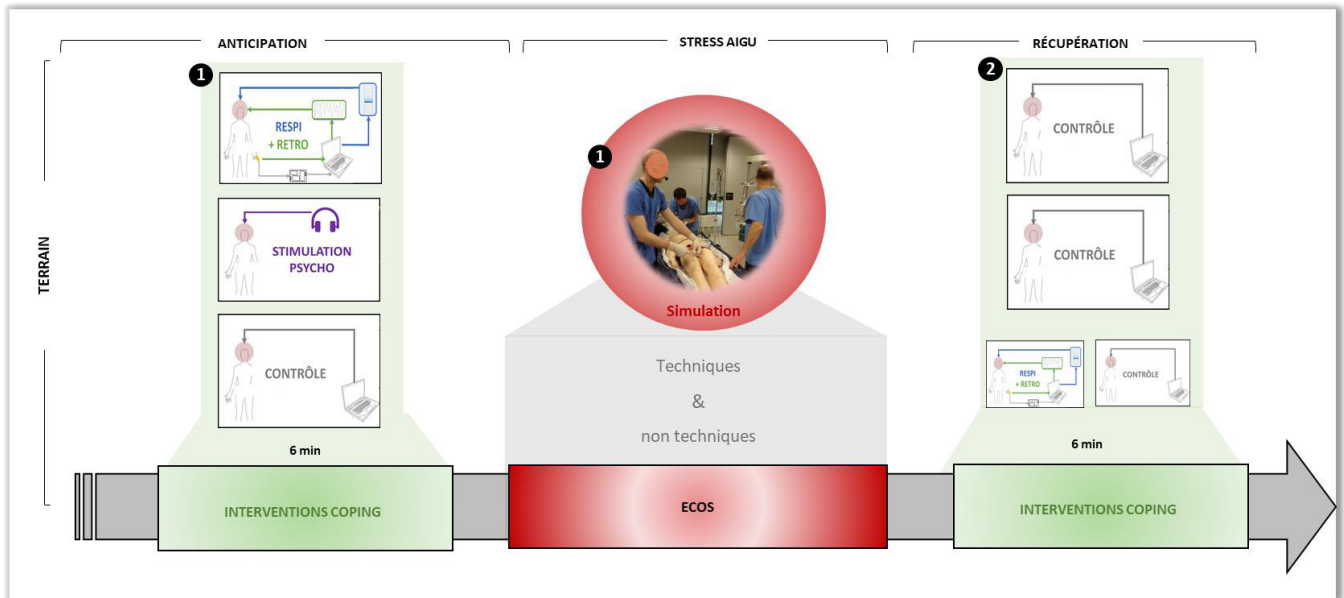


Figure 68. Protocole expérimental du projet ECOSTRESS. RESPI : respiration relaxante standardisée à 6 cycles par minute. RETRO : technique de rétrocontrôle biologique basée sur la variabilité de la fréquence cardiaque. Contrôle : activité libre et silencieuse des étudiants (lecture, téléphone portable). 1. Les interventions RESPI + RETRO et la STIMULATION PSYCHOLOGIQUE pré événement stressant (ECOS) ont pour but de diminuer la réponse psychophysio­logique durant l'anticipation et l'événement stressant, il est attendu que ces techniques permettent d'améliorer les performances durant les ECOS. 2. L'intervention RESPI + RETRO post événement stressant a pour but de diminuer la réponse psychophysio­logique post événement stressant et diminuer les processus de rumination.

**Stimulation psychologique.** La technique cognitive méditative sera guidée par l'écoute d'une bande son préenregistrée (créée par Antoine Lutz <sup>62</sup>). Précédée d'une installation confortable favorisant l'introspection, la stimulation psychologique alternera différentes phases : prise de conscience de son environnement, de son corps et de ses pensées (approche méditation de pleine conscience) ; relaxation corporelle et respiratoire ; stimulation des ressources cognitives et motivationnelles spécifiquement orientée vers l'exercice des ECOS.

<sup>62</sup> Pour plus de détails, voir : <https://www.researchgate.net/profile/Antoine-Lutz>

## 5.2. Étude perspective 2 : remédiation du stress chronique

Les effets délétères du stress aigu et chronique sur le bien-être et la performance soulignent la nécessité d'explorer des techniques de remédiation. Le traitement habituel d'un stress chronique repose sur une prise en charge médicamenteuse et/ou des thérapies comportementales. Cependant, ces traitements peuvent entraîner des effets secondaires et/ou des résistances individuelles. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles approches thérapeutiques non-invasives adaptées à la majorité des individus. Les effets délétères du stress chronique s'expriment notamment sur certaines structures cérébrales. Alors que le stress renforce les connexions neuronales dans l'amygdale, il induit une perte de neurones, des atrophies dendritiques, et plus généralement une diminution du volume hippocampique et du CPFdl (Kremen et al., 2010; Lupien et al., 2018, 2007a; Roozendaal et al., 2009; Sousa et al., 2008) <sup>63</sup>.

La STCC anodale du CPFdl et le VFC-RETRO ont été investigués de manière isolée afin de diminuer les pathologies associées au stress (Boggio et al., 2008; Caldwell et Steffen, 2018; Siepmann et al., 2008). Nos résultats démontrent que l'application simultanée d'un VFC-RETRO et de la STCC est la combinaison la plus efficace pour diminuer les réponses psychophysiologiques du stress aigu. Toutefois, l'effet potentialisé attendu de l'intervention cumulée dans le cas d'un traitement du stress chronique reste à démontrer. Il est attendu que des applications de STCC répétées favorisent la neuroplasticité <sup>64</sup> à la fois de la zone simulée focale (CPFdl) mais également des structures sous-corticales plus profondes qui sont connectées à la zone corticale ciblée (Rozisky et al., 2016).

Le potentiel d'une STCC anodale du CPFdl couplée ou non à un VFC-RETRO, afin de contre-carrer la plasticité mal-adaptative associée au stress chronique, restait à ce jour inexploré. Le but de cette future étude est *i)* de tester l'impact du VFC-RETRO seul ou couplé à une STCC anodale du CPFdl sur l'amélioration des symptômes anxieux et *ii)* de déterminer les substrats cérébraux de cette amélioration. Pour cela, des étudiants en médecine en état de stress chronique (n=30, score anxiété STAI > 55) seront répartis de manière aléatoire en 3 groupes en fonction de l'intervention : CONTROLE, VFC-RETRO, VFC-RETRO + STCC (Fig. 69). Ils effectueront ces interventions durant 15 minutes, 3 fois par semaines et pendant 6 semaines. La condition

---

<sup>63</sup> Pour plus de détails, voir chapitre : impact du stress chronique : Modification des structures cérébrales.

<sup>64</sup> Le terme de « neuroplasticité » définit la propriété des structures du système nerveux à se modifier (ex : neurogénèse, myélinisation, synaptogenèse, potentialisation long terme) sous l'effet d'une stimulation.

contrôle sera un programme éducatif théorique sur la gestion du stress et le bien-être au travail. Avant, juste après, puis 3 mois après la fin des interventions, ils effectueront un examen en imagerie par résonance magnétique (anatomique et fonctionnelle).

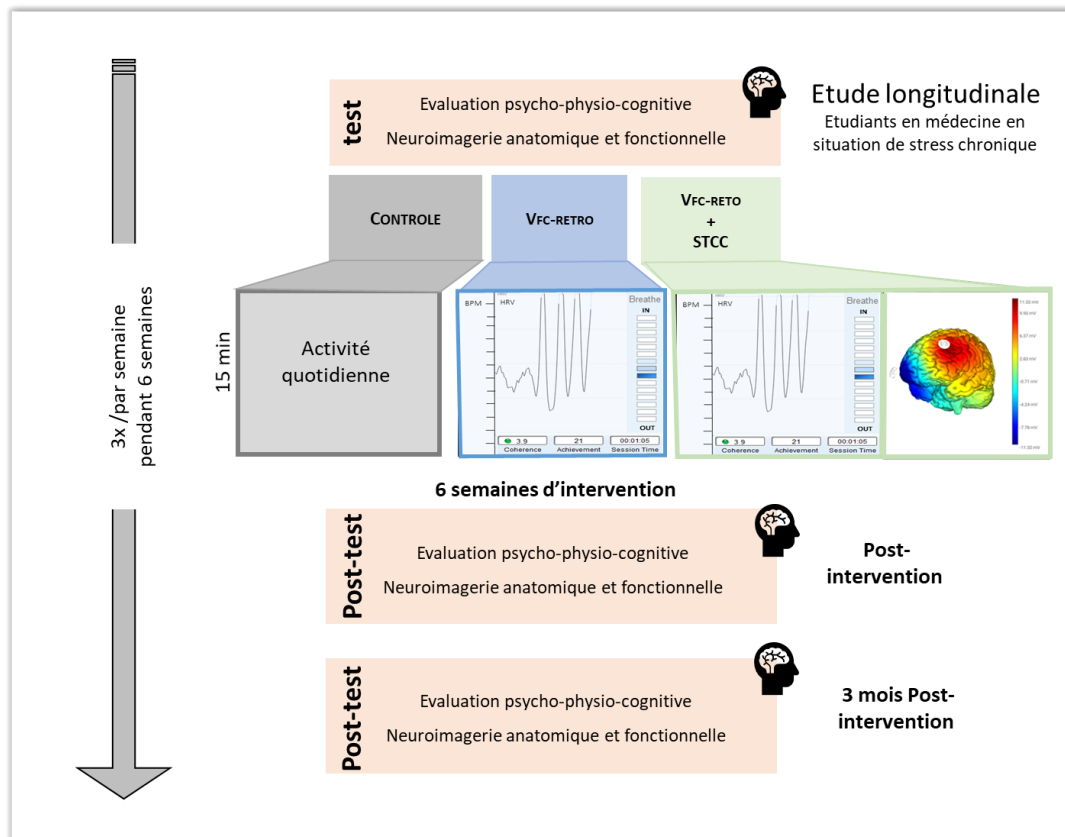


Figure 69. Protocole expérimental du projet REMEDIATION STRESS CHRONIQUE. CONTROLE : programme éducatif sur le stress et le bien-être VFC-RETRO : technique de rétrocontrôle biologique basée sur la variabilité de la fréquence cardiaque. STCC : stimulation anodale du cortex préfrontal dorsolatéral. Les interventions seront appliquées 15 minutes, 3 fois par semaines et pendant 6 semaines. Les tests et post test sont constitués des mêmes éléments : une imagerie par résonance magnétique (anatomique et fonctionnelle). Les régions d'intérêt sont le cortex préfrontal dorsolatéral, l'hippocampe et l'amygdale. L'imagerie fonctionnelle permettra de caractériser les réseaux neuronaux activés lors d'une confrontation à une situation stressante (images stressantes et souvenirs autoréférencés). Des évaluations psychologiques, les habitudes de sommeil, les réponses du système nerveux végétatif et immunitaire seront également recueillies.

L'imagerie anatomique permettra de caractériser les volumes des structures préfrontales, hippocampiques et amygdaliennes, c'est-à-dire définir la plasticité cérébrale induite par l'exposition aux techniques de remédiation. L'imagerie fonctionnelle permettra de caractériser les réseaux neuronaux activés lors d'une confrontation à une situation stressante (images stressantes et souvenir autoréférencé). Des évaluations psychologiques, les habitudes de sommeil, les réponses du système nerveux végétatif et immunitaire seront également recueillies. Nous supposons qu'une application de l'intervention cumulée VFC-RETRO + STCC induira des changements fonctionnels et structurels des régions hypo activées ou réduites par le stress chronique. Plus précisément, nous attendons une perte moins importante de l'épaisseur du CPFdl et de l'hippocampe, dans les groupes interventionnels que dans le groupe

contrôle. Nous supposons également qu'à la suite des interventions, les réponses amygdaliennes à des stimuli stressants seront moins intenses dans les groupes interventionnels que le groupe contrôle.

### 5.3. Stress et pandémie de COVID-19

La pandémie actuelle de covid-19 a largement accentué la survenue de situations stressantes et inédites (Dedoncker et al., 2021). Des modifications profondes s'observent aux différentes échelles organisationnelles de la société, les modes de vie individuels, familiaux, et professionnels ayant été profondément bouleversés. À ces changements, qui nécessitent une adaptabilité importante, viennent s'ajouter des stressors répétés tels que la crainte de perdre son travail où ses revenus, l'isolement, la peur de la maladie, voire de la mort pour les plus fragiles. Par ailleurs, l'impossibilité de se rendre à la sépulture d'un proche ou encore la peur de mourir isolé à l'hôpital sont des stressors extrêmement intenses et dommageables. De plus, de profondes discordances entre membres d'une même communauté, voire d'une même famille, sur les modalités d'application des règles sanitaires comme le port du masque ou la vaccination, ont également généré des nouvelles ruptures. Ces stressors ont été - et sont encore - vécus tout au long de cette crise mondiale sans précédent, et plus particulièrement durant les premiers mois de restrictions de libertés individuelles. La fin des restrictions ne signe malheureusement pas celle des situations stressantes. En effet, un nombre important de personnes souffrent aujourd'hui du « syndrome de la cabane », qui est caractérisé par une appréhension de sortir de chez soi. L'auto-isolement et la quarantaine ont affecté les activités habituelles et peuvent conduire à une augmentation de la solitude, de l'anxiété, de la dépression, de l'insomnie, de l'automutilation ou de comportements suicidaires (Kumar et Nayar, 2020). Des stratégies de gestions émotionnelles néfastes ont également été observées avec une augmentation de la consommation d'alcool et de drogues chez certaines personnes fragiles (Kumar et Nayar, 2020). Ainsi, les bilans sur la santé mentale se multiplient et n'ont jamais été aussi alarmants <sup>65</sup>. L'occurrence de ces stressors fait craindre une augmentation d'ampleur mondiale des pathologies mentales associées au stress

---

<sup>65</sup> Pour plus de détails, voir : <https://www.lefigaro.fr/sciences/covid-19-la-pandemie-aura-un-impact-a-long-terme-sur-la-sante-mentale-alerte-l-oms-20210722>, <https://lapauseinfo.fr/covid-19-impact-sante-mentale-oms/> , <https://www.euro.who.int/en/health-topics/health-emergencies/coronavirus-covid-19/publications-and-technical-guidance/noncommunicable-diseases/mental-health-and-covid-19>.

dans les années à venir, avec une inertie difficilement prévisible (World Health Organization, 2020). La crainte que la situation sanitaire ne s'améliore pas, ou pas rapidement, accentue le côté imprévisible et incontrôlable, et donc le caractère stressant, de la situation globale. La communauté scientifique alerte sur la multiplication des variants du virus et l'arrivée d'une 4<sup>ème</sup> vague, ce qui nous plonge à nouveau dans l'incertitude. Ainsi, aujourd'hui plus que jamais, déterminer et mettre en place des techniques efficaces de gestion du stress sont indispensables. Des outils peu coûteux et faciles à mettre en place, notamment dans la pratique professionnelle, doivent être proposés au plus grand nombre. Nos travaux de thèse ont permis de déterminer des moyens simples et efficaces. Comme premier pas dans cette direction, les techniques de respiration relaxante et de VFC-RETRO pourraient être aujourd'hui proposées dans des services spécialisés de prévention/soin, comme les services de santé universitaire <sup>66</sup> ou de santé au travail. Nous entrons dans une ère paradoxale où la situation sanitaire va indéniablement pousser les individus à se recentrer sur eux, à prendre soin d'eux et à trouver un meilleur équilibre de vie. Cela passe par une prévention et/ou remédiation efficace du stress et de ses conséquences que ce soit dans la sphère professionnelle ou personnelle.

---

<sup>66</sup> Durant cette thèse, nous avons accompagné et formé le service de santé Universitaire de Lyon 1 au cours de son l'acquisition d'appareils de VFC-RETRO.

## 6. Bibliographie

- Abdulghani, H., 2008. Stress and depression among medical students: A cross sectional study at a Medical College in Saudi Arabia. *Pakistan J. Med. Sci.* 24, 12–17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2929.2005.02176.x>
- Alexander, J.K., Hillier, A., Smith, R.M., Tivarus, M.E., Beversdorf, D.Q., 2007. Beta-adrenergic modulation of cognitive flexibility during stress. *J. Cogn. Neurosci.* 19, 468–478. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.3.468>
- Almojali, A.I., Almalki, S.A., Alothman, A.S., Masuadi, E.M., Alaqeel, M.K., 2017. The prevalence and association of stress with sleep quality among medical students. *J. Epidemiol. Glob. Health* 7, 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.jegh.2017.04.005>
- Ankri, Y.L.E., Braw, Y., Luboshits, G., Meiron, O., 2020. The effects of stress and transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory: A randomized controlled trial. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 20, 103–114. <https://doi.org/10.3758/s13415-019-00755-7>
- Antal, A., Fischer, T., Saiote, C., Miller, R., Chaieb, L., Wang, D.J.J., Plessow, F., Paulus, W., Kirschbaum, C., 2014. Transcranial electrical stimulation modifies the neuronal response to psychosocial stress exposure. *Hum. Brain Mapp.* 35, 3750–3759. <https://doi.org/10.1002/hbm.22434>
- Arnsten, A.F.T., 2015. Stress weakens prefrontal networks : molecular insults to higher cognition. *Nat. Rev. Neurosci.* 18, 1376–1385. <https://doi.org/10.1038/nrn.4087>
- Arnsten, A.F.T., 2009. Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nat. Rev. Neurosci.* 10, 410–422. <https://doi.org/10.1038/nrn2648>
- Arnsten, A.F.T., Raskind, M.A., Taylor, F.B., Connor, D.F., 2015. The effects of stress exposure on prefrontal cortex: Translating basic research into successful treatments for post-traumatic stress disorder. *Neurobiol. Stress* 1, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.ynstr.2014.10.002>
- Arora, S., Aggarwal, R., Moran, A., Sirimanna, P., Crochet, P., Darzi, A., Kneebone, R., Sevdalis, N., 2011. Mental practice: Effective stress management training for novice surgeons. *J. Am. Coll. Surg.* 212, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2010.09.025>
- Arora, S., Sevdalis, N., Nestel, D., Woloshynowych, M., Darzi, A., Kneebone, R., 2010. The impact of stress on surgical performance: A systematic review of the literature. *Surgery* 147, 318–330.e6. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2009.10.007>
- Bajunaid, K., Mullah, M.A.S., Winkler-Schwartz, A., Alotaibi, F.E., Fares, J., Baggiani, M., Azarnoush, H., Christie, S., Al-Zhrani, G., Marwa, I., Sabbagh, A.J., Werthner, P., Del Maestro, R.F., 2017. Impact of acute stress on psychomotor bimanual performance during a simulated tumor resection task. *J. Neurosurg.* 126, 71–80. <https://doi.org/10.3171/2015.5.JNS15558>
- Barsuk, J.H., McGaghie, W.C., Cohen, E.R., O’Leary, K.J., Wayne, D.B., 2009. Simulation-based mastery learning reduces complications during central venous catheter insertion in a medical intensive care unit. *Crit. Care Med.* 37, 2697–2701. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181a57bc1>
- Bathalon, S., Dorion, D., Darveau, S., Martin, M., 2005. Cognitive Skills Analysis, Kinesiology, and Mental Imagery in the Acquisition of Surgical Skills. *J. Otolaryngol.* 34, 328. <https://doi.org/10.2310/7070.2005.34506>
- Baum, A., Trevino, L.A., Dougalln, A., 2010. Stress and the Cancers, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 411–424.
- Beauchamp, M.R., Benali, H., Albinson, J.G., 2002. Pre-competition imagery, self-efficacy and performance in collegiate golfers. *J. Sports Sci.* 20, 697–705.
- Berg, R.J., Inaba, K., Sullivan, M., Okoye, O., Siboni, S., Minneti, M., Teixeira, P.G., Demetriades, D., 2015. The impact of heat stress on operative performance and cognitive function during simulated laparoscopic operative tasks. *Surg. (United States)* 157, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2014.06.012>
- Berneiser, J., Jahn, G., Grothe, M., Lotze, M., 2018. From visual to motor strategies: Training in mental rotation of hands. *Neuroimage* 167, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.06.014>
- Bernstein, M., Wood, M.D., 2018. Effect of Anticipatory Stress on Placebo Alcohol Consumption in a Bar-Laboratory. *Am J Drug Alcohol Abus.* 43, 95–102. <https://doi.org/10.1080/00952990.2016.1209514.Effect>
- Berretz, G., Packheiser, J., Kumsta, R., Wolf, O.T., Ocklenburg, S., 2021. The brain under stress—A systematic review and activation likelihood estimation meta-analysis of changes in BOLD signal associated with acute stress exposure.

Neurosci. Biobehav. Rev. 124, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.01.001>

- Berry, M.E., Chapple, I.T., Ginsberg, J.P., Gleichauf, K.J., Meyer, J.A., Nagpal, M.L., 2014. Non-pharmacological Intervention for Chronic Pain in Veterans: A Pilot Study of Heart Rate Variability Biofeedback. *Glob. Adv. Heal. Med.* 3, 28–33. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2013.075>
- Bersani, F.S., Minichino, A., Bernabei, L., Spagnoli, F., Corrado, A., Vergnani, L., Mannarelli, D., Pauletti, C., Fattapposta, F., Biondi, M., Delle Chiaie, R., 2017. Prefronto-cerebellar tDCS enhances neurocognition in euthymic bipolar patients. Findings from a placebo-controlled neuropsychological and psychophysiological investigation. *J. Affect. Disord.* 209, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2016.11.037>
- Bibbey, A., Carroll, D., Roseboom, T.J., Phillips, A.C., de Rooij, S.R., 2013. Personality and physiological reactions to acute psychological stress. *Int. J. Psychophysiol.* 90, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.10.018>
- Bogdanov, M., Schwabe, L., 2016. Transcranial stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex prevents stress-induced working memory deficits. *J. Neurosci.* 36, 1429–1437. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3687-15.2016>
- Boggio, P.S., Rigonatti, S.P., Ribeiro, R.B., Myczkowski, M.L., Nitsche, M.A., Pascual-leone, A., Fregni, F., 2008. A randomized, double-blind clinical trial on the efficacy of cortical direct current stimulation for the treatment of major depression. *Int. J. Neuropsychopharmacol.* 11, 249–254. <https://doi.org/10.1017/S1461145707007833.A>
- Borg, G.A.V., 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sport. Exerc.* 14, 377–381.
- Bouchard, S., Bernier, F., Boivin, É., Morin, B., Robillard, G., 2012. Using biofeedback while immersed in a stressful videogame increases the effectiveness of stress management skills in soldiers. *PLoS One* 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036169>
- Boyle, G.J., Helmes, E., Matthews, G., Izard, C.E., 2015. Measures of Affect Dimensions, Measures of Personality and Social Psychological Constructs. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386915-9.00008-5>
- Brooks, R.P., Jones, M.T., Hale, M.W., Lunau, T., Dragano, N., Wright, B.J., 2019. Positive verbal feedback about task performance is related with adaptive physiological responses: An experimental study of the effort-reward imbalance stress model. *Int. J. Psychophysiol.* 135, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.11.007>
- Brouwer, A.M., Neerinx, M.A., Kallen, V., Leer, van der, L., Brinke, te, M., 2011. EEG alpha asymmetry, heart rate variability and cortisol in response to virtual reality induced stress. *J. Cybertherapy Rehabil.* 4, 27–40.
- Bruchon-Schweitzer, M., Paulhan, I., 1993. Inventaire d'Anxiété Trait-État. Forme Y. STAI-Y, Centre de. ed, C.D. Spielberger. Paris.
- Brühl, A.B., Scherpiet, S., Sulzer, J., Stämpfli, P., Seifritz, E., Herwig, U., 2014. Real-time neurofeedback using functional MRI could improve down-regulation of amygdala activity during emotional stimulation: A proof-of-concept study. *Brain Topogr.* 27, 138–148. <https://doi.org/10.1007/s10548-013-0331-9>
- Brunoni, A.R., Nitsche, M.A., Bolognini, N., Bikson, M., Wagner, T., Merabet, L., Edwards, D.J., Valero-Cabre, A., Rotenberg, A., Pascual-Leone, A., Ferrucci, R., Priori, A., Boggio, P.S., Fregni, F., 2012. Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): Challenges and future directions. *Brain Stimul.* 5, 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.03.002>
- Brunoni, A.R., Vanderhasselt, M., Boggio, P.S., Fregni, F., Dantas, E.M., Mill, J.G., Lotufo, P.A., Benseñor, I.M., 2013a. Polarity- and valence-dependent effects of prefrontal transcranial direct current stimulation on heart rate variability and salivary cortisol. *Psychoneuroendocrinology* 38, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2012.04.020>
- Brunoni, A.R., Vanderhasselt, M.A., 2014. Working memory improvement with non-invasive brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex: A systematic review and meta-analysis. *Brain Cogn.* 86, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.01.008>
- Brunoni, A.R., Zanao, T.A., Ferrucci, R., Priori, A., Valiengo, L., de Oliveira, J.F., Boggio, P.S., Lotufo, P.A., Benseñor, I.M., Fregni, F., 2013b. Bifrontal tDCS prevents implicit learning acquisition in antidepressant-free patients with major depressive disorder. *Prog. Neuro-Psychopharmacology Biol. Psychiatry* 43, 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2012.12.019>
- Brunoni, A.R., Zanao, T.A., Vanderhasselt, M., Valiengo, L., De Oliveira, J.F., Boggio, P.S., Lotufo, P.A., Benseñor, I.M., Fregni, F., 2013c. Enhancement of Affective Processing Induced by Bifrontal Transcranial Direct Current Stimulation in Patients With Major Depression. *Neuromodulation* 17, 138–142. <https://doi.org/10.1111/ner.12080>
- Buchanan, T.W., Lovallo, W.R., 2001. Enhanced memory for emotional material following stress-level cortisol treatment in humans. *Psychoneuroendocrinology* 26, 307–317.

- Burch, J.B., Alexander, M., Balte, P., Sofge, J., Winstead, J., Kothandaraman, V., Ginsberg, J.P., 2019. Shift Work and Heart Rate Variability Coherence: Pilot Study Among Nurses. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 44. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-9419-z>
- Burg, M.M., Pickering, T.G., 2010. The Cardiovascular System, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 37–46.
- Burgess, N., Maguire, E.A., O’Keefe, J., 2002. The Human Hippocampus and Review Spatial and Episodic Memory. *Neuron* 35, 625–641.
- Cain, M.S., Dunsmoor, J.E., LaBar, K.S., Mitroff, S.R., 2011. Anticipatory Anxiety Hinders Detection of a Second Target in Dual-Target Search. *Psychol. Sci.* 22, 866–871. <https://doi.org/10.1177/0956797611412393>
- Caldwell, Y.T., Steffen, P.R., 2018. Adding HRV biofeedback to psychotherapy increases heart rate variability and improves the treatment of major depressive disorder. *Int. J. Psychophysiol.* 131, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.01.001>
- Carnevali, L., Pattini, E., Sgoifo, A., Ottaviani, C., 2019. Effects of prefrontal transcranial direct current stimulation on autonomic and neuroendocrine responses to psychosocial stress in healthy humans. *Stress* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1080/10253890.2019.1625884>
- Carver, C.S., 2010. Coping, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 221–229.
- Cerritelli, B., Maruff, P., Wilson, P., Currie, J., 2000. The effect of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behav. Brain Res.* 108, 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(99\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(99)00138-2)
- CESH, 2007. How to measure stress in humans? Quebec.
- Chida, Y., Steptoe, A., 2010. Greater cardiovascular responses to laboratory mental stress are associated with poor subsequent cardiovascular risk status: A meta-analysis of prospective evidence. *Hypertension* 55, 1026–1032. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.109.146621>
- Childre, D., Martin, H., 1999. *The HeartMath solution*, Harper. ed. San Francisco.
- Claverie, D., Trousselard, M., Sigwalt, F., Petit, G., Evain, J.N., Bui, M., Guinet-Lebreton, A., Chassard, D., Duclos, A., Lehot, J.J., Rimmelé, T., Canini, F., Lilot, M., 2020. Impact of stress management strategies and experience on electrodermal activity during high-fidelity simulation of critical situations. *Br. J. Anaesth.* 125, e410–e412. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.07.024>
- Cohen, E.R., Feinglass, J., Barsuk, J.H., Barnard, C., O’Donnell, A., McGaghie, W.C., Wayne, D.B., 2010. Cost savings from reduced catheter-related bloodstream infection after simulation-based education for residents in a medical intensive care unit. *Simul. Healthc.* 5, 98–102. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3181bc8304>
- Cohen, S., Janicki-Deverts, D., Miller, G.E., 2007. Psychological stress and disease. *J. Am. Med. Assoc.* 298, 1685–1687. <https://doi.org/10.1001/jama.298.14.1685>
- Collet, C., El Hajj, M., Chaker, R., Bui-xuan, B., Lehot, J.-J., El Hoyek, N., 2020. Effect of motor imagery and actual practice on learning professional medical skills. *BMC Med. Educ.*
- Collet, C., Guillot, A., Lebon, F., Macintyre, T., Moran, A., 2011. Measuring Motor Imagery Using Psychometric, Behavioral, and Psychophysiological Tools. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 39, 85–92.
- Colzato, L.S., Jongkees, B.J., de Wit, M., van der Molen, M.J.W., Steenbergen, L., 2018. Variable heart rate and a flexible mind: Higher resting-state heart rate variability predicts better task-switching. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 18, 730–738. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0600-x>
- Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), 2010. *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*, Springer P. ed. New York.
- Cook, D., Hatala, R., Brydges, R., Zendejas, B., Szostek, J.H., Wang, A.T., Erwin, P.J., Hamstra, S.J., 2011. Technology-Enhanced Simulation For Health Professions Education : A systematic Review and Meta-analysis. *J. Am. Med. Assoc.* 306, 978–988.
- Cooper, S., Cant, R., Connell, C., Sims, L., Porter, J.E., Symmons, M., Nestel, D., Liaw, S.Y., 2016. Measuring teamwork performance: Validity testing of the Team Emergency Assessment Measure (TEAM) with clinical resuscitation teams. *Resuscitation* 101, 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2016.01.026>
- Corbetta, M., Shulman, G.L., 2002. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 3,



201–215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>

- Cornwell, R.E., Boothroyd, L., Burt, D.M., Feinberg, D.R., Jones, B.C., Little, A.C., Pitman, R., Whiten, S., Perrett, D.I., 2004. Concordant preferences for opposite-sex signals? Human pheromones and facial characteristics. *Proc. R. Soc. Lond. B* 271, 635–640. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2649>
- Cox, R.C., Olatunji, B.O., 2020. Sleep in the anxiety-related disorders: A meta-analysis of subjective and objective research. *Sleep Med. Rev.* 51, 101282. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2020.101282>
- Cutshall, S.M., Wentworth, L.J., Wahner-Roedler, D.L., Vincent, A., Schmidt, J.E., Loehrer, L.L., Cha, S.S., Bauer, B.A., 2011. Evaluation of a biofeedback-assisted meditation program as a stress management tool for hospital nurses: A pilot study. *Explor. J. Sci. Heal.* 7, 110–112. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2010.12.004>
- Dahl, E., 2017. Debriefing of the medical team after emergencies on cruise ships. *Int. Marit. Health.* <https://doi.org/10.5603/IMH.2017.0034>
- Dallman, M.F., Hellhammer, D., 2010. Regulation of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis, Chronic Stress, and Energy: The Role of Brain Networks, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 11–37.
- Davison, S., Raison, N., Khan, M.S., Dasgupta, P., Ahmed, K., 2017. Mental training in surgical education: a systematic review. *ANZ J. Surg.* 87, 873–878. <https://doi.org/10.1111/ans.14140>
- Daya, Z., Heath Hearn, J., 2018. Mindfulness interventions in medical education: A systematic review of their impact on medical student stress, depression, fatigue and burnout. *Med. Teach.* 40, 146–153. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2017.1394999>
- de Berker, A.O., Tirole, M., Rutledge, R.B., Cross, G.F., Dolan, R.J., Bestmann, S., 2016. Acute stress selectively impairs learning to act. *Sci. Rep.* 6:29816. <https://doi.org/10.1038/srep29816>
- De Kloet, E.R., Meijer, O.C., De Nicola, A.F., De Rijk, R.H., Joëls, M., 2018. Importance of the brain corticosteroid receptor balance in metaplasticity, cognitive performance and neuro-inflammation. *Front. Neuroendocrinol.* 49, 124–145. <https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2018.02.003>
- De Raedt, R., Hooley, J.M., 2016. The role of expectancy and proactive control in stress regulation: A neurocognitive framework for regulation expectation. *Clin. Psychol. Rev.* 45, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2016.03.005>
- Debarnot, U., Sahraoui, D., Champely, S., Collet, C., Guillot, A., 2012. Selective influence of circadian modulation and task characteristics on motor imagery time. *Res. Q. Exerc. Sport* 83, 1–9. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599879>
- Debarnot, U., Schlatter, S., Monteil, J., Guillot, A., 2019. Early stimulation of the left posterior parietal cortex promotes representation change in problem solving. *Sci. Rep.* 9, 16523. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52668-7>
- Dedoncker, J., Brunoni, A.R., Baeken, C., Vanderhasselt, M.A., 2016. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Healthy and Neuropsychiatric Samples: Influence of Stimulation Parameters. *Brain Stimul.* 9, 501–517. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.006>
- Dedoncker, J., Vanderhasselt, M.-A., Ottaviani, C., Slavich, G.M., 2021. Mental Health During the Covid-19 Pandemic and Beyond: the Importance of the Vagus Nerve for Biopsychosocial Resilience. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 125, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.010>
- Dedovic, K., D’Aguiar, C., Pruessner, J.C., 2009. What Stress Does to Your Brain : A Review of Neuroimaging Studies. *Can. J. Psychiatry* 54, 6–15.
- Dedovic, K., Renwick, R., Mahani, N.K., Engert, V., Lupien, S.J., Pruessner, J.C., 2005. The Montreal Imaging Stress Task: Using functional imaging to investigate the effects of perceiving and processing psychosocial stress in the human brain. *J. Psychiatry Neurosci.* 30, 319–325.
- Delignières, D., 1993. Anxiété et performance, in: J.P. Famosé (Ed.), *Cognition et Performance*. INSEP, Paris, pp. 235–254.
- DeMaria, S., Bryson, E.O., Mooney, T.J., Silverstein, J.H., Reich, D.L., Bodian, C., Levine, A.I., 2010. Adding emotional stressors to training in simulated cardiopulmonary arrest enhances participant performance. *Med. Educ.* 44, 1006–1015. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2010.03775.x>
- Demougeot, L., Papaxanthis, C., 2011. Muscle Fatigue Affects Mental Simulation of Action. *J. Neurosci.* 31, 10712–10720. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6032-10.2011>
- DeWitte, N.A.J., Buyck, I., Van Daele, T., 2019. Combining Biofeedback with Stress Management Interventions: A Systematic Review of Physiological and Psychological Effects. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 0, 1–14.

<https://doi.org/10.1007/s10484-018-09427-7>

- DeWitte, S., Baeken, C., Pulopulos, M.M., Josephy, H., Schiettecatte, J., Anckaert, E., De Raedt, R., Vanderhasselt, M.-A., 2020. The effect of neurostimulation applied to the left dorsolateral prefrontal cortex on post-stress adaptation as a function of depressive brooding. *Prog. Neuro-Psychopharmacology Biol. Psychiatry* 96, 109687. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2019.109687>
- Dhabhar, F.S., 2010. Effects of Stress on Immune Function: Implications for Immunoprotection and Immunopathology, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 47–64.
- Di Rienzo, F., Collet, C., Hoyek, N., Guillot, A., 2012. Selective Effect of Physical Fatigue on Motor Imagery Accuracy. *PLoS One* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047207>
- Dias, R., Neto, A., 2016. Stress levels during emergency care: A comparison between reality and simulated scenarios. *J. Crit. Care* 33, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2016.02.010>
- Dickerson, S.S., Kemeny, M.E., 2004. Acute Stressors and Cortisol Responses: A Theoretical Integration and Synthesis of Laboratory Research. *Psychol. Bull.* 130, 355–391. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.3.355>
- Dierolf, A.M., Fechtner, J., Böhnke, R., Wolf, O.T., Naumann, E., 2017. Influence of acute stress on response inhibition in healthy men: An ERP study. *Psychophysiology* 54, 684–695. <https://doi.org/10.1111/psyp.12826>
- Digman, J., 1990. Personality Structure: Emergence of the Five-Factor Model. *Annu. Rev. Psychol.* 41, 417–440. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.41.020190.002221>
- Dillon, A., Kelly, M., Robertson, I.H., Robertson, D.A., 2016. Smartphone applications utilizing biofeedback can aid stress reduction. *Front. Psychol.* 7, 832. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>
- Dolfen, N., King, B.R., Schwabe, L., Swinnen, S., Albouy, G., 2019. Glucocorticoid response to stress induction prior to learning is negatively related to subsequent motor memory consolidation. *Neurobiol. Learn. Mem.* 158, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.01.009>
- Duan, H., Wang, X., Hu, W., Kounios, J., 2019. Effects of acute stress on divergent and convergent problem-solving. *Think. Reason.* 0, 1–19. <https://doi.org/10.1080/13546783.2019.1572539>
- Dupee, M., Werthner, P., 2011. Managing the Stress Response : The Use of Biofeedback and Neurofeedback with Olympic Athletes. *Biofeedback* 39, 92–94. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-39.3.02>
- Dutheil, F., Aubert, C., Pereira, B., Dambun, M., Moustafa, F., Merillod, M., Baker, J.S., Trousselard, M., Lesage, F.X., Navel, V., 2019. Suicide among physicians and health-care workers: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 14, 1–28. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226361>
- Ebstrup, J.F., Eplov, L.F., Pisinger, C., Jørgensen, T., 2011. Association between the five factor personality traits and perceived stress: Is the effect mediated by general self-efficacy? *Anxiety, Stress Coping* 24, 407–419. <https://doi.org/10.1080/10615806.2010.540012>
- El Khamali, R., Mouaci, A., Valera, S., Cano-Chervel, M., Pinglis, C., Sanz, C., Allal, A., Attard, V., Malardier, J., Delfino, M., et al., 2018. Effects of a multimodal program including simulation on job strain among nurses working in intensive care units a randomized clinical trial. *JAMA - J. Am. Med. Assoc.* 320, 1988–1997. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.14284>
- Evain, J.N., Perrot, A., Vincent, A., Cejka, J.C., Bauer, C., Duclos, A., Rimmelé, T., Lehot, J.-J., Lilot, M., 2019. Team planning discussion and clinical performance: a prospective, randomised, controlled simulation trial. *Anaesthesia* 74, 488–496. <https://doi.org/10.1111/anae.14602>
- Evain, J.N., Zoric, L., Mattatia, L., Picard, O., Ripart, J., Cuvillon, P., 2017. Residual anxiety after high fidelity simulation in anaesthesiology: An observational, prospective, pilot study. *Anaesth. Crit. Care Pain Med.* 36, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2016.09.008>
- Everaerd, D., Klumpers, F., van Wingen, G., Tendolkar, I., Fernández, G., 2015. Association between neuroticism and amygdala responsivity emerges under stressful conditions. *Neuroimage* 112, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.03.014>
- Eysenck, M.W., Derakshan, N., Santos, R., Calvo, M.G., 2007. Anxiety and cognitive performance: Attentional control theory. *Emotion* 7, 336–353. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.336>
- Felmingham, K.L., Rennie, C., Manor, B., Bryant, R.A., 2011. Eye tracking and physiological reactivity to threatening stimuli in posttraumatic stress disorder. *J. Anxiety Disord.* 25, 668–673. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2011.02.010>

- Ferguson, E., 2008. Health anxiety moderates the daytime cortisol slope. *J. Psychosom. Res.* 64, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2008.01.011>
- Ferreira Dias Kanthack, T., Guillot, A., Ricardo Altimari, L., Nunez Nagy, S., Collet, C., Di Rienzo, F., 2016. Selective efficacy of static and dynamic imagery in different states of physical fatigue. *PLoS One* 11, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149654>
- Firth-Cozens, J., Greenhalgh, J., 1997. Doctors' perceptions of the links between stress and lowered clinical care. *Soc. Sci. Med.* 44, 1017–1022. [https://doi.org/10.1016/S0277-9536\(96\)00227-4](https://doi.org/10.1016/S0277-9536(96)00227-4)
- Flin, R., Paul, O., Crichton, M., 2008. *Safety at the sharp end: a guide to non-technical skills*, Crichton. ed. Aldershot, UK.
- Fregni, F., Boggio, P.S., Nitsche, M., Marcolin, M.A., Rigonatti, S.P., Silva, M.T.A., Paulus, W., 2005. Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Exp. Brain Res.* 166, 23–30. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2334-6>
- Fregni, F., Boggio, P.S., Santos, M.C., Lima, M., Vieira, A.L., Rigonatti, S.P., Silva, M.T.A., Barbosa, E.R., Nitsche, M.A., Pascual-Leone, A., 2006. Noninvasive cortical stimulation with transcranial direct current stimulation in Parkinson's disease. *Mov. Disord.* 21, 1693–1702. <https://doi.org/10.1002/mds.21012>
- Gaab, J., Rohleder, N., Nater, U.M., Ehlert, U., 2005. Psychological determinants of the cortisol stress response: The role of anticipatory cognitive appraisal. *Psychoneuroendocrinology* 30, 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2005.02.001>
- Gagnon, S.A., Wagner, A.D., 2016. Acute stress and episodic memory retrieval: Neurobiological mechanisms and behavioral consequences. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1369, 55–75. <https://doi.org/10.1111/nyas.12996>
- Gallego, J., Aguilar-Parra, J.M., Cangas, A.J., Langer, Á.I., Mañas, I., 2014. Effect of a mindfulness program on stress, anxiety and depression in university students. *Span. J. Psychol.* 17, 1–6. <https://doi.org/10.1017/sjp.2014.102>
- García-Banda, G., Servera, M., Chellev, K., Meisel, V., Fornes, J., Cardo, E., Perez, G., Riesco, M., Doctor, R.M., 2011. Prosocial personality traits and adaptation to stress. *Soc. Behav. Pers.* 39, 1337–1348. <https://doi.org/10.2224/sbp.2011.39.10.1337>
- Gartner, M., Rohde-Liebenau, L., Grimm, S., Bajbouj, M., 2014. Working memory-related frontal theta activity is decreased under acute stress. *psychoneuroendocrinologie* 43, 105–113.
- Gauthier, J., Bouchard, S., 1993. Adaptation Canadienne-Française de la forme révisée du State-Trait Anxiety Inventory de Spielberger. *Can. J. Behav. Sci.* 25, 559–578. <https://doi.org/10.1037/h0078881>
- Gerrin, W., 2010. Acute Stress Response in the Psychological Laboratory, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 501–515.
- Gevirtz, R., 2013. The Promise of Heart Rate Variability Biofeedback: Evidence-Based Applications. *Biofeedback* 41, 110–120. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.01>
- Ghazali, D.A., Darmian-Rafei, I., Nadolny, J., Sosner, P., Ragot, S., Oriot, D., 2018. Evaluation of stress response using psychological, biological, and electrophysiological markers during immersive simulation of life threatening events in multidisciplinary teams. *Aust. Crit. Care* 31, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2017.07.001>
- Gianaros, P.J., Derbtshire, S.W.G., May, J.C., Siegle, G.J., Gamalo, M.A., Jennings, J.R., 2005. Anterior cingulate activity correlates with blood pressure during stress. *Psychophysiology* 42, 627–635. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00366.x>
- Gianaros, P.J., Jennings, J.R., Sheu, L.K., Greer, P.J., Kuller, L.H., Matthews, K.A., 2007. Prospective reports of chronic life stress predict decreased grey matter volume in the hippocampus. *Neuroimage* 35, 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.10.045>
- Gianaros, P.J., O'Connor, M.-F., 2010. Neuroimaging Methods in Human Stress Science, in: Contrada, R., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 543–563.
- Gianferante, D., Thoma, M. V., Hanlin, L., Chen, X., Breines, J.G., Zoccola, P.M., Rohleder, N., 2014. Post-stress rumination predicts HPA axis responses to repeated acute stress. *Psychoneuroendocrinology* 49, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.07.021>
- Gilet, A.L., 2008. Procédures d'induction d'humeurs en laboratoire : une revue critique. *Encephale* 34, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2006.08.003>
- Girotti, M., Adler, S.M., Bulin, S.E., Fucich, E.A., Paredes, D., Morilak, D.A., 2018. Prefrontal cortex executive processes

- affected by stress in health and disease. *Prog. Neuro-Psychopharmacology Biol. Psychiatry* 85, 161–179. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2017.07.004>
- Giustolisi, B., Vergallito, A., Cecchetto, C., Varoli, E., Romero Lauro, L.J., 2018. Anodal transcranial direct current stimulation over left inferior frontal gyrus enhances sentence comprehension. *Brain Lang.* 176, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.11.001>
- Glover, S., Bibby, E., Tuomi, E., 2020. Executive functions in motor imagery: support for the motor-cognitive model over the functional equivalence model. *Exp. Brain Res.* 238, 931–944. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05756-4>
- Goessl, V.C., Curtiss, J.E., Hofmann, S.G., 2017. The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety: A meta-analysis. *Psychol. Med.* 47, 2578–2586. <https://doi.org/10.1017/S0033291717001003>
- Goldberg, A., Silverman, E., Samuelson, S., Katz, D., Lin, H.M., Levine, A., DeMaria, S., 2015. Learning through simulated independent practice leads to better future performance in a simulated crisis than learning through simulated supervised practice. *Br. J. Anaesth.* 114, 794–800. <https://doi.org/10.1093/bja/aeu457>
- Gonçalves, E.M., Neves de Jesus, S., 2012. Stress prevention by modulation of autonomic nervous system (heart rate variability): A preliminary study using transcranial direct current stimulation. *Open J. Psychiatry* 2, 113–122. <https://doi.org/10.4236/ojpsych.2012.22016>
- Gonzalez-Bono, E., Moya-Albiol, L., Salvador, A., Carrillo, E., Ricarte, J., Gomez-Amor, J., 2002. Anticipatory autonomic response to a public speaking task in women: The role of trait anxiety. *Biol. Psychol.* 60, 37–49. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(02\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(02)00008-X)
- Goodman, R.N., Rietschel, J.C., Lo, L.-C., Costanzo, M.E., Hat, B.D., 2013. Stress, emotion regulation and cognitive performance: The predictive contributions of trait and state relative frontal EEG alpha asymmetry. *Int. J. Psychophysiol.* 87, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.09.008>
- Gould, C.E., Spira, A.P., Liou-Johnson, V., Cassidy-Eagle, E., Kawai, M., Mashal, N., O'Hara, R., Beaudreau, S.A., 2018. Association of Anxiety Symptom Clusters with Sleep Quality and Daytime Sleepiness. *Journals Gerontol. - Ser. B Psychol. Sci. Soc. Sci.* 73, 413–420. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbx020>
- Grosprêtre, S., Grandperrin, Y., Nicolier, M., Gimenez, P., Vidal, C., Tio, G., Haffen, E., Bennabi, D., 2021. Effect of transcranial direct current stimulation on the psychomotor, cognitive, and motor performances of power athletes. *Sci. Rep.* 11, 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89159-7>
- Gross, J.J., 1998. The emerging field of emotion regulation: An integrative review. *Rev. Gen. Psychol.* 2, 271–299. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.271>
- Grunberg, N.E., Berger, S.S., Hamilton, K.R., 2010. Stress and Drug Use, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science: Biology, Psychology, and Health*. Springer Publishing Company, New York, pp. 287–300.
- Gueugneau, N., Mauvieux, B., Papaxanthis, C., 2009. Circadian modulation of mentally simulated motor actions: Implications for the potential use of motor imagery in rehabilitation. *Neurorehabil. Neural Repair* 23, 237–245. <https://doi.org/10.1177/1545968308321775>
- Guillot, A., Collet, C., 2010. *The Neurophysiological Foundations of Mental and Motor Imagery*. Oxford University Press Inc., Oxford, New York.
- Guillot, A., Collet, C., 2008. Construction of the Motor Imagery Integrative Model in Sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *Int. Rev. Sport Exerc. Psychol.* 1, 31–44. <https://doi.org/10.1080/17509840701823139>
- Guillot, A., Collet, C., Dittmar, A., Delhomme, G., C, D., Vernet-Maury, E., 2003. The Physiological Activation Effect on Performance in Shooting. *J. Psychophysiol.* 17, 214–222.
- Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., Collet, C., 2012. Understanding the timing of motor imagery: recent findings and future directions. *Int. Rev. Sport Exerc. Psychol.* 5, 3–22. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2011.623787>
- Guiraud, V., Touzé, E., Rouillon, F., Godefroy, O., Mas, J.L., 2012. Stressful life events as triggers of ischemic stroke: A case-crossover study. *Int. J. Stroke* 8, 300–307. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4949.2012.00810.x>
- Gurman, G.M., Klein, M., Weksler, N., 2012. Professional stress in anesthesiology: A review. *J. Clin. Monit. Comput.* 26, 329–335. <https://doi.org/10.1007/s10877-011-9328-7>
- Hall, C.R., Martin, K.A., 1997. Measuring movement imagery abilities: A revision of the Movement Imagery Questionnaire. *J. Ment. Imag.* 21, 143–154.

- Hall, J.C., 2002. Imagery practice and the development of surgical skills. *Am. J. Surg.* 184, 465–470. [https://doi.org/10.1016/S0002-9610\(02\)01007-3](https://doi.org/10.1016/S0002-9610(02)01007-3)
- Hallman, D.M., Olsson, E.M.G., von Scheele, B., Melin, L., Lyskov, E., 2011. Effects of Heart Rate Variability Biofeedback in Subjects with Stress-Related Chronic Neck Pain: A Pilot Study. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 36, 71–80. <https://doi.org/10.1007/s10484-011-9147-0>
- Hanakawa, T., Dimyan, M.A., Hallett, M., 2008. Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: A time-course study with functional MRI. *Cereb. Cortex* 18, 2775–2788. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn036>
- Harvey, A., Bandiera, G., Nathens, A.B., LeBlanc, V.R., 2012. Impact of stress on resident performance in simulated trauma scenarios. *J. Trauma Acute Care Surg.* 72, 497–503. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31821f84be>
- Hawryluck, L., Brindley, P.G., 2018. Psychological burnout and critical care medicine: big threat, big opportunity. *Intensive Care Med.* 44, 2239–2241. <https://doi.org/10.1007/s00134-018-5063-6>
- Heegde, ter F., De Rijk, R.H., Vinkers, C.H., 2015. The brain mineralocorticoid receptor and stress resilience. *Psychoneuroendocrinology* 52, 92–110. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.10.022>
- Helbig, S., Backhaus, J., 2017. “Sex differences in a real academic stressor, cognitive appraisal and the cortisol response.” *Physiol. Behav.* 179, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.05.027>
- Henckens, M.J.A.G., Pu, Z., Hermans, E.J., Van Wingen, G.A., Joëls, M., Fernández, G., 2012. Dynamically changing effects of corticosteroids on human hippocampal and prefrontal processing. *Hum. Brain Mapp.* 33, 2885–2897. <https://doi.org/10.1002/hbm.21409>
- Heremans, E., Helsen, W.F., Feys, P., 2008. The eyes as a mirror of our thoughts: Quantification of motor imagery of goal-directed movements through eye movement registration. *Behav. Brain Res.* 187, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2007.09.028>
- Hermans, E.J., Van Marle, H.J.F., Ossewaarde, L., Henckens, M.J.A.G., Qin, S., Van Kesteren, M.T.R., Schoots, V.C., Cousijn, H., Rijpkema, M., Oostenveld, R., Fernández, G., 2011. Stress-related noradrenergic activity prompts large-scale neural network reconfiguration. *Science* (80). 334, 1151–1153. <https://doi.org/10.1126/science.1209603>
- Herten, N., Otto, T., Wolf, O.T., 2017. The role of eye fixation in memory enhancement under stress – An eye tracking study. *Neurobiol. Learn. Mem.* 140, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2017.02.016>
- Hertenstein, E., Waibel, E., Frase, L., Riemann, D., Feige, B., Nitsche, M.A., Kaller, C.P., Nissen, C., 2019. Modulation of creativity by transcranial direct current stimulation. *Brain Stimul.* 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.06.004>
- Hétu, S., Grégoire, M., Saimpont, A., Coll, M., Eugène, F., Michon, P., Jackson, P.L., 2013. The neural network of motor imagery: An ALE meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 37, 930–949. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.017>
- Hilgarter, K., Schmid-Zalaudek, K., Csanády-Leitner, R., Mörtl, M., Rössler, A., Lackner, H.K., 2021. Phasic heart rate variability and the association with cognitive performance: A cross-sectional study in a healthy population setting. *PLoS One* 16, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246968>
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R., Dement, W., 1973. Quantification of Sleepiness: A New Approach. *Psychophysiology* 10, 431–436.
- Hogeveen, J., Grafman, J., Aboseria, M., David, A., Bikson, M., Hauner, K.K., 2016. Effects of High-Definition and Conventional tDCS on Response Inhibition. *Brain Stimul.* 9, 720–729. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.015>
- Hoy, K.E., Emonson, M.R.L., Arnold, S.L., Thomson, R.H., Daskalakis, Z.J., Fitzgerald, P.B., 2013. Testing the limits: Investigating the effect of tDCS dose on working memory enhancement in healthy controls. *Neuropsychologia* 51, 1777–1784. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.018>
- Hsu, F.C., Garside, M.J., Massey, A.E., McAllister-Williams, R.H., 2003. Effects of a single dose of cortisol on the neural correlates of episodic memory and error processing in healthy volunteers. *Psychopharmacology (Berl)*. 167, 431–442. <https://doi.org/10.1007/s00213-003-1413-2>
- Hyun, J., Sliwinski, M.J., Smyth, J.M., 2018. Waking Up on the Wrong Side of the Bed: The Effects of Stress Anticipation on Working Memory in Daily Life. *Journals Gerontol. Ser. B* 00, 1–9. <https://doi.org/10.1093/geronb/gby042>
- Ignacio, J., Dolmans, D., Scherpbier, A., Rethans, J.-J., Chan, S., Liaw, S.Y., 2016. Stress and anxiety management strategies in health professions’ simulation training: a review of the literature. *BMJ Simul. Technol. Enhanc. Learn.* 2, 42–46. <https://doi.org/10.1136/bmjstel-2015-000097>

- Ikeda, T., Takahashi, T., Hiraishi, H., Saito, D.N., Kikuchi, M., 2019. Anodal transcranial direct current stimulation induces high gamma-band activity in the left dorsolateral prefrontal cortex during a working memory task: A double-blind, randomized, crossover study. *Front. Hum. Neurosci.* 13, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00136>
- Inserm, 2011. Bases neurobiologiques et neuroendocriniennes du stress, in: Institut national de la santé et de la recherche médicale (Ed.), *Stress Au Travail et Santé - Situation Chez Les Indépendants*. Paris, pp. 171–191.
- Ironson, G.H., O’Cleirigh, C., Weiss, A., Schneiderman, N., Costa, P.T., 2008. Personality and HIV disease progression: Role of NEO-PI-R openness, extraversion, and profiles of engagement. *Psychosom. Med.* 70, 245–253. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e31816422fc>
- Isbell, L.M., Boudreaux, E.D., Chimowitz, H., Liu, G., Cyr, E., Kimball, E., 2020. What do emergency department physicians and nurses feel A qualitative study of emotions, triggers, regulation strategies, and effects on patient care. *BMJ Qual. Saf.* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2019-010179>
- Ishak, W., Nikravesh, R., Lederer, S., Perry, R., Ogunyemi, D., Bernstein, C., 2013. Burnout in medical students: A systematic review. *Clin. Teach.* 10, 242–245. <https://doi.org/10.1111/tct.12014>
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., Doyon, J., 2003. Functional cerebral reorganization following motor sequence learning through mental practice with motor imagery. *Neuroimage* 20, 1171–1180. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00369-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00369-0)
- Jackson, S.H., 1999. The role of stress in anaesthetists’ health and well-being. *Acta Anaesthesiol. Scand.* 43, 583–602. <https://doi.org/10.1034/j.1399-6576.1999.430601.x>
- James, B., Collins, D., 1997. Self-Presentation Sources of Competitive Stress During Performance. *J. Sport Exerc. Psychol.* 19, 17–35. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Janssen, M., Heerkens, Y., Kuijter, W., Van Der Heijden, B., Engels, J., 2018. Effects of mindfulness-based stress reduction on employees’ mental health: A systematic review, *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191332>
- Jeannerod, M., 1994. The representing Brain : Neural correlates of motor imagery and intention. *Behav. Brain Sci.* 17, 187–245.
- Jeon, S.Y., Han, S.J., 2012. Improvement of the working memory and naming by transcranial direct current stimulation. *Ann. Rehabil. Med.* 36, 585–595. <https://doi.org/10.5535/arm.2012.36.5.585>
- Jiménez Morgan, S., Molina Mora, J.A., 2017. Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Sport Performance, a Systematic Review. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 42, 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>
- John, O., Donahue, E., Kentle, R., 1991. The Big Five Inventory-Versions 4a and 54. *Inst. Personal. Soc. Res.*
- John, O., Srivastava, S., 1999. The Big Five trait taxonomy: history, measurement, and theoretical perspectives., in: *Handbook of Personality: Theory and Research*. Guilford press, New York, p. 102.
- Jonassaint, C.R., Why, Y.P., Bishop, G.D., Tong, E.M., Diong, S.M., Enkelmann, H.C., Khader, M., Ang, J., 2009. The effects of Neuroticism and Extraversion on cardiovascular reactivity during a mental and an emotional stress task. *Int. J. Psychophysiol.* 74, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.09.012>
- Jonathan, P., Kerr, G., Sullivan, J.P., 2018. A critical review of consumer wearables , mobile applications and equipment for providing biofeedback , monitoring stress and sleep in physically active populations . *Tissue Repair and Translational Physiology Research Program , School of Biomedical Scien. Front. Physiol.* in press. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00743>
- Jones, A.L., Charlesworth, J.F., Hendra, T.J., 2000. Patient mood and carer strain during stroke rehabilitation in the community following early hospital discharge. *Disabil. Rehabil.* 22, 490–494. <https://doi.org/10.1080/096382800413970>
- Juster, R.P., Perna, A., Marin, M.-F., Sindi, S., Lupien, S.J., 2012. Timing is everything: Anticipatory stress dynamics among cortisol and blood pressure reactivity and recovery in healthy adults. *Stress* 15, 569–577. <https://doi.org/10.3109/10253890.2012.661494>
- Kalia, M., 2002. Assessing the economic impact of stress - The modern day hidden epidemic. *Metabolism* 51, 49–53. <https://doi.org/10.1053/meta.2002.33193>
- Kan, R.L.D., Zhang, B.B.B., Zhang, J.J.Q., Kranz, G.S., 2020. Non-invasive brain stimulation for posttraumatic stress disorder: a systematic review and meta-analysis. *Transl. Psychiatry* 10. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-0851-5>
- Ke, Y., Wang, N., Du, J., Kong, L., Liu, S., Xu, M., An, X., Ming, D., 2019. The effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory training in healthy young adults. *Front. Hum. Neurosci.* 13, 1–10.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00019>

- Kemp, A.H., Quintana, D.S., 2013. The relationship between mental and physical health: Insights from the study of heart rate variability. *Int. J. Psychophysiol.* <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.06.018>
- Kim, J., Neilipovitz, D., Cardinal, P., Chiu, M., Clinch, J., 2006. A pilot study using high-fidelity simulation to formally evaluate performance in the resuscitation of critically ill patients: The University of Ottawa Critical Care Medicine, High-Fidelity Simulation, and Crisis Resource Management I Study. *Crit. Care Med.* 34, 2167–2174. <https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000229877.45125.CC>
- Kim, K.J., 2016. Factors associated with medical student test anxiety in objective structured clinical examinations: a preliminary study. *Int. J. Med. Educ.* 7, 424–427. <https://doi.org/10.5116/ijme.5845.caec>
- Kirschbaum, C., Kudielka, B.M., Gaab, J., Schommer, N., Hellhammer, D.H., 1999. Impact of Gender, Menstrual Cycle Phase, and Oral Contraceptives on the Activity of the Hypothalamus-Pituitary-Adrenal Axis. *Psychosom. Med.* 162, 154–162.
- Kirschbaum, C., Pirke, K.M., Hellhammer, D.H., 1993. The 'Trier Social Stress Test' - a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology* 28, 76–81. <https://doi.org/119004>
- Kirschbaum, C., Prussner, J.C., Stone, A.A., Federenko, I., Gaab, J., Lintz, D., Schommer, N., Hellhammer, D.H., 1995. Persistent high cortisol responses to repeated psychological stress in a subpopulation of healthy men. *Psychosom. Med.* 57, 468–474. <https://doi.org/10.1097/00006842-199509000-00009>
- Kirschbaum, C., Wolf, O.T., May, M., Wippich, W., Hellhammer, D.H., 1996. Stress- and treatment-induced elevations of cortisol levels associated with impaired declarative memory in healthy adults. *Life Sci.* 58, 1475–1483. [https://doi.org/10.1016/0024-3205\(96\)00118-X](https://doi.org/10.1016/0024-3205(96)00118-X)
- Klopp, C., Garcia, C., Schulman, A.H., Ward, C.P., Tartar, J.L., 2012. Acute social stress increases biochemical and self report markers of stress without altering spatial learning in humans. *Act. Nerv. Super. Rediviva* 54, 15–20.
- Kotozaki, Y., Takeuchi, H., Sekiguchi, A., Yamamoto, Y., Shinada, T., Araki, T., Takahashi, K., Taki, Y., Ogino, T., Kiguchi, M., Kawashima, R., 2014. Biofeedback-based training for stress management in daily hassles: An intervention study. *Brain Behav.* 4, 566–579. <https://doi.org/10.1002/brb3.241>
- Krage, R., Tjon Soei Len, L., Schober, P., Kolenbrander, M., Van Groenigen, D., Loer, S.A., Wagner, C., Zwaan, L., 2014. Does individual experience affect performance during cardiopulmonary resuscitation with additional external distractors? *Anaesthesia* 69, 983–989. <https://doi.org/10.1111/anae.12747>
- Krage, R., Zwaan, L., Tjon Soei Len, L., Kolenbrander, M.W., Van Groenigen, D., Loer, S.A., Wagner, C., Schober, P., 2017. Relationship between non-technical skills and technical performance during cardiopulmonary resuscitation: Does stress have an influence? *Emerg. Med. J.* 34, 728–733. <https://doi.org/10.1136/emermed-2016-205754>
- Kremen, W.S., O'Brien, R.C., Panizzon, M.S., Prom-Wormley, E., Eaves, L.J., Eisen, S.A., Eyer, L.T., Hauger, R.L., Fennema-Notestine, C., Fischl, B., Grant, M.D., Hellhammer, D.H., Jak, A.J., Jacobson, K.C., Jernigan, T.L., Lupien, S.J., Lyons, M.J., Mendoza, S.P., Neale, M.C., Seidman, L.J., Thermenos, H.W., Tsuang, M.T., Dale, A.M., Franz, C.E., 2010. Salivary cortisol and prefrontal cortical thickness in middle-aged men: A twin study. *Neuroimage* 53, 1093–1102. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.026>
- Kudielka, B.M., Buske-Kirschbaum, A., Hellhammer, D.H., Kirschbaum, C., 2004a. HPA axis responses to laboratory psychosocial stress in healthy elderly adults, younger adults, and children: impact of age and gender. *Psychoneuroendocrinology* 29, 83–98. [https://doi.org/10.1016/S0306-4530\(02\)00146-4](https://doi.org/10.1016/S0306-4530(02)00146-4)
- Kudielka, B.M., Schommer, N.C., Hellhammer, D.H., Kirschbaum, C., 2004b. Acute HPA axis responses, heart rate, and mood changes to psychosocial stress (TSST) in humans at different times of day. *Psychoneuroendocrinology* 29, 983–992. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2003.08.009>
- Kumar, A., Nayar, K.R., 2020. COVID 19 and its mental health consequences. *J. Ment. Heal.* 0, 1–2. <https://doi.org/10.1080/09638237.2020.1757052>
- Laborde, S., Hosang, T., Mosley, E., Dosseville, F., 2019. Influence of a 30-Day Slow-Paced Breathing Intervention Compared to Social Media Use on Subjective Sleep Quality and Cardiac Vagal Activity. *J. Clin. Med.* 8, 193. <https://doi.org/10.3390/jcm8020193>
- Lacourse, M.G., Orr, E.L.R., Cramer, S.C., Cohen, M.J., 2005. Brain activation during execution and motor imagery of novel and skilled sequential hand movements. *Neuroimage* 27, 505–519. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.04.025>
- Lanata, A., Sebastiani, L., Di Gruttola, F., Di Modica, S., Scilingo, E.P., Greco, A., 2020. Nonlinear Analysis of Eye-Tracking Information for Motor Imagery Assessments. *Front. Neurosci.* 13, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01431>

- Lang, P., Bradley, M., Cuthbert, B., 2001. International Affective Picture System (IAPS): Instruction manual and affective ratings. Tech. Rep.
- Laureys, S., 2019. La méditation, c'est bon pour le cerveau.
- Lavadera, P., Millon, E.M., Shors, T.J., 2020. MAP Train My Brain: Meditation Combined with Aerobic Exercise Reduces Stress and Rumination while Enhancing Quality of Life in Medical Students. *J. Altern. Complement. Med.* 26, 418–423. <https://doi.org/10.1089/acm.2019.0281>
- Lazarus, R.S., 1999. *Stress and Emotion: A New Synthesis*. New York.
- Lazarus, R.S., 1966. *Psychological Stress and the Coping Process*. New York.
- Lazarus, R.S., Folkman, S., 1984. *Stress, appraisal, and coping*, Springer P. ed. New York.
- Le Barbenchon, E., Dantzer, C., Pellissier, S., Gauchet, A., 2016. L'intérêt de la prise en charge basée sur la mindfulness dans la maladie somatique, in: Bungener, C., Flahault, C., Untas, A. (Eds.), *Interventions Psychothérapeutiques Dans Les Maladies Somatiques : Accompagner Les Patients et Leurs Proches*. De Boeck.
- Leblanc, V.R., 2009. The effects of acute stress on performance: Implications for health professions education. *Acad. Med.* 84, 25–33. <https://doi.org/10.1097/ACM.0b013e3181b37b8f>
- Leblanc, V.R., Regehr, C., Tavares, W., Scott, A.K., MacDonald, R., King, K., 2012. The impact of stress on paramedic performance during simulated critical events. *Prehosp. Disaster Med.* 27, 369–374. <https://doi.org/10.1017/S1049023X12001021>
- Lee-Flynn, S.C., Pomaki, G., DeLongis, A., Biesanz, J.C., Puterman, E., 2011. Daily cognitive appraisals, daily affect, and long-term depressive symptoms: The role of self-esteem and self-concept clarity in the stress process. *Personal. Soc. Psychol. Bull.* 37, 255–268. <https://doi.org/10.1177/0146167210394204>
- Lehrer, P., Gevirtz, R., 2014. Heart rate variability biofeedback: How and why does it work? *Front. Psychol.* 5, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00756>
- Lehrer, P., Kaur, K., Sharma, A., Shah, K., Huseby, R., Bhavsar, J., Zhang, Y., 2020. Heart Rate Variability Biofeedback Improves Emotional and Physical Health and Performance: A Systematic Review and Meta Analysis. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 45, 109–129. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09466-z>
- Lehrer, P., Vaschillo, E., Vaschillo, B., 2000. Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability : Rationale and manual for training. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 25, 177–191. <https://doi.org/10.1023/A>
- Lelaidier, R., Balança, B., Boet, S., Faure, A., Lilot, M., Lecomte, F., Lehot, J.-J., Rimmelé, T., Cejka, J.C., 2017. Use of a hand-held digital cognitive aid in simulated crises: The MAX randomized controlled trial. *Br. J. Anaesth.* 119, 1015–1021. <https://doi.org/10.1093/bja/aex256>
- Lemaire, J.B., Wallace, J.E., Lewin, A.M., de Grood, J., Schaefer, J.P., 2011. The effect of a biofeedback-based stress management tool on physician stress: A randomized controlled clinical trial. *Open Med.* 5, 154–165.
- Lesage, F.X., Berjot, S., Deschamps, F., 2012. Psychometric properties of the french versions of the perceived stress scale. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 25, 178–184. <https://doi.org/10.2478/S13382-012-0024-8>
- Lesage, F.X., Chamoux, A., Berjot, S., 2009. Stabilité de l'échelle visuelle analogique dans l'évaluation du stress. *Arch. des Mal. Prof. l'Environnement* 70, 619–622. <https://doi.org/10.1016/j.admp.2009.10.016>
- Li, M.S., Du, X.D., Chu, H.C., Liao, Y.Y., Pan, W., Li, Z., Hung, G.C.L., 2019. Delayed effect of bifrontal transcranial direct current stimulation in patients with treatment-resistant depression: A pilot study. *BMC Psychiatry* 19, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12888-019-2119-2>
- Lilot, M., 2019. *Techniques cognitives pour l'amélioration des acquisitions en simulation de situations médicales critiques*. Université Claude Bernard Lyon 1.
- Lilot, M., Evain, J.N., Bauer, C., Cejka, J.C., Faure, A., Balança, B., Vassal, O., Payet, C., Bui Xuan, B., Duclos, A., Lehot, J.-J., Rimmelé, T., 2018. Relaxation before debriefing during high-fidelity simulation improves memory retention of residents at three months. *Anesthesiology* 128, 638–649. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000002045>
- Liston, C., Miller, M.M., Goldwater, D.S., Radley, J.J., Rocher, A.B., Hof, P.R., Morrison, J.H., McEwen, B.S., 2006. Stress-Induced Alterations in Prefrontal Cortical Dendritic Morphology Predict Selective Impairments in Perceptual Attentional Set-Shifting. *J. Neurosci.* 26, 7870–7874. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1184-06.2006>
- Liu, Q., Zhang, W., 2020. Sex differences in stress reactivity to the trier social stress test in virtual reality. *Psychol. Res. Behav.*



- Manag. 13, 859–869. <https://doi.org/10.2147/PRBM.S268039>
- Liu, Y., Du, S., 2018. Psychological stress level detection based on electrodermal activity. *Behav. Brain Res.* 341, 50–53. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2017.12.021>
- Loftus, A.M., Yalcin, O., Baughman, F.D., Vanman, E.J., Hagger, M.S., 2015. The impact of transcranial direct current stimulation on inhibitory control in young adults. *Brain Behav.* 0, e00332. <https://doi.org/10.1002/brb3.332>
- Lorey, B., Pilgramm, S., Walter, B., Stark, R., Munzert, J., Zentgraf, K., 2010. Your mind's hand: Motor imagery of pointing movements with different accuracy. *Neuroimage* 49, 3239–3247. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.11.038>
- Lovallo, W.R., 1975. The Cold Pressor Test and Autonomic Function: A review and integration. *Psychophysiology* 12.
- Lü, W., Wang, Z., You, X., 2016. Physiological responses to repeated stress in individuals with high and low trait resilience, *Biological Psychology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.08.005>
- Lundberg, U., 2010. Neuroendocrine Measures, in: Contrada, R., Baum, An. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 531–543.
- Lupien, S.J., De Leon, M., De Santi, S., Convit, A., Tarshish, C., Nair, N.P.V., Thakur, M., McEwen, B.S., Hauger, R.L., Meaney, M.J., 1998. Cortisol levels during human aging predict hippocampal atrophy and memory deficits. *Nat. Neurosci.* 1, 69–73. <https://doi.org/10.1038/271>
- Lupien, S.J., Evans, A., Lord, C., Miles, J., Pruessner, M., Pike, B., Pruessner, J., 2007a. Hippocampal volume is as variable in young as in older adults: Implications for the notion of hippocampal atrophy in humans. *Neuroimage* 34, 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.09.041>
- Lupien, S.J., Gillin, C.J., Hauger, R.L., 1999. Working Memory Is More Sensitive Than Declarative Memory to the Acute Effects of Corticosteroids : A Dose-Response Study in Humans. *Behav. Neurosci.* 113, 420–430.
- Lupien, S.J., Juster, R.P., Raymond, C., Marin, M.-F., 2018. The effects of chronic stress on the human brain: From neurotoxicity, to vulnerability, to opportunity. *Front. Neuroendocrinol.* 49, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2018.02.001>
- Lupien, S.J., Maheu, F., Tu, M., Fiocco, A., Schramek, T.E., 2007b. The effects of stress and stress hormones on human cognition: Implications for the field of brain and cognition. *Brain Cogn.* 65, 209–237. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2007.02.007>
- MacQueen, G., Frodl, T., 2011. The hippocampus in major depression: Evidence for the convergence of the bench and bedside in psychiatric research. *Mol. Psychiatry* 16, 252–264. <https://doi.org/10.1038/mp.2010.80>
- Malliani A, 2005. Heart rate variability: from bench to bedside. *Eur. J. Intern. Med.* 16, 12–20.
- Malouin, F., Jackson, P.L., Richards, C.L., 2013. Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front. Hum. Neurosci.* 7, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00576>
- Malouin, F., Richards, C.L., 2010. Mental practice for relearning locomotor skills. *Phys. Ther.* 90, 240–251. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090029>
- Malouin, F., Richards, C.L., Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Durand, A., Doyon, J., 2007. The kinesthetic and visual imagery questionnaire (KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: A reliability and construct validity study. *J. Neurol. Phys. Ther.* 31, 20–29. <https://doi.org/10.1097/01.NPT.0000260567.24122.64>
- Manning-Geist, B., Meyer, F., Chen, J., Pelletier, A., Kosman, K., Chen, X. (Phoenix), Johnson, N.R., 2020. Pre-clinical Stress Management Workshops Increase Medical Students' Knowledge and Self-awareness of Coping with Stress. *Med. Sci. Educ.* 30, 235–241. <https://doi.org/10.1007/s40670-019-00881-4>
- Mansouri, F.A., Fehring, D.J., Feizpour, A., Gaillard, A., Rosa, M.G.P., Rajan, R., Jaberzadeh, S., 2016. Direct current stimulation of prefrontal cortex modulates error-induced behavioral adjustments. *Eur. J. Neurosci.* 44, 1856–1869. <https://doi.org/10.1111/ejn.13281>
- Margolis, R.D., Strupp, K.M., Beacham, A.O., Yaster, M., Austin, T.M., Macrae, A.W., Diaz-Berenstain, L., Janosy, N.R., 2021. The effects of COVID-19 on pediatric anesthesiologists: A survey of the members of the Society for Pediatric Anesthesia, *Anesthesia & Analgesia*. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000005422>
- Marieb, E.N., Hoehn, K., 2016a. The Cardiovascular System: The Heart, in: Beuparlant, S. (Ed.), *Human Anatomy & Physiology*. Harlow, pp. 683–712.
- Marieb, E.N., Hoehn, K., 2016b. The Respiratory System, in: Beuparlant, S. (Ed.), *Human Anatomy & Physiology*. Harlow, pp.

- Marin, M.-F., Lord, C., Andrews, J., Juster, R.P., Sindi, S., Arseneault-Lapierre, G., Fiocco, A.J., Lupien, S.J., 2011. Chronic stress, cognitive functioning and mental health. *Neurobiol. Learn. Mem.* 96, 583–595. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2011.02.016>
- Markert, R.J., Rodenhauer, P., El-Baghdadi, M.M., Juskaite, K., Hillel, A.T., Marton, B.A., 2008. Personality as a prognostic factor for specialty choice: A prospective study of 4 medical school classes. *MedGenMed Medscape Gen. Med.* 10, 1–7.
- Maron, B.A., Fein, S., Maron, B.J., Hillel, A.T., Baghdadi, M.M. El, Rodenhauer, P., 2007. Ability of Prospective Assessment of Personality Profiles to Predict the Practice Specialty of Medical Students. *Baylor Univ. Med. Cent. Proc.* 20, 22–26. <https://doi.org/10.1080/08998280.2007.11928228>
- Marques, L.M., Morello, L.Y.N., Boggio, P.S., 2018. Ventrolateral but not Dorsolateral Prefrontal Cortex tDCS effectively impact emotion reappraisal – effects on Emotional Experience and Interbeat Interval. *Sci. Rep.* 8, 15295. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33711-5>
- Martens, R., Vealey, R.S., Burton, D., 1990. *Competitive Anxiety in Sport*. Human Kinetics, Champaign, Illinois.
- Mason, J.W., 1968. A review of psychoendocrine research on the sympathetic-adrenal medullary system. *Psychosom. Med.* 30, 576–607. <https://doi.org/1968/09000>
- Mateo, S., Reilly, K.T., Collet, C., Rode, G., 2018. Descriptive pilot study of vividness and temporal equivalence during motor imagery training after quadriplegia. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 61, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.06.003>
- Mather, M., Thayer, J.F., 2018. How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Curr. Opin. Behav. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.12.017>
- McCaffery, J., 2010. Genetic Epidemiology of Stress and Gene by Stress Interaction, in: Contrada, R., Baum, An. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 78–85.
- McCrae, R.R., Costa, P.T., 1987. Validation of the Five-Factor Model of Personality Across Instruments and Observers. *J. Pers. Soc. Psychol.* 52, 81–90. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.52.1.81>
- McCrae, R.R., John, O.P., 1992. An introduction to the Five-Factor Model and Its Applications. *J. Pers.* 60, 1–3.
- McCraty, R., Atkinson, M., Lipsenthal, L., Arguelles, L., 2009a. New hope for correctional officers: An innovative program for reducing stress and health risks. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 34, 251–272. <https://doi.org/10.1007/s10484-009-9087-0>
- McCraty, R., Atkinson, M., Tiller, W.A., Rein, G., Watkins, A.D., 1995. The effects of emotions on short-term power spectrum analysis of heart rate variability. *Am. J. Cardiol.* 15, 1089–1093.
- McCraty, R., Atkinson, M., Tomasino, D., Bradley, R., 2009b. The Coherent Heart-Brain Interactions, Psychophysiological Coherence, and the emergence of System-Wide Order. *Integr. Rev. A Transdiscipl. Transcult. J. Nex Thought, Res. Prax.* 5.
- McCraty, R., Zayas, M.A., 2014. Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability and psychosocial well-being. *Front. Psychol.* 5, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01090>
- McEwen, B.S., Nasca, C., Gray, J.D., 2016. Stress Effects on Neuronal Structure: Hippocampus, Amygdala, and Prefrontal Cortex. *Neuropsychopharmacology*. <https://doi.org/10.1038/npp.2015.171>
- McInnes, K., Friesen, C., Boe, S., 2016. Specific brain lesions impair explicit motor imagery ability: A systematic review of the evidence. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 97, 478–489.e1. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.07.012>
- Meier, N.F., Welch, A.S., 2016. Walking versus biofeedback: a comparison of acute interventions for stressed students. *Anxiety, Stress Coping* 29, 463–478. <https://doi.org/10.1080/10615806.2015.1085514>
- Meiron, O., Lavidor, M., 2013. Unilateral prefrontal direct current stimulation effects are modulated by working memory load and gender. *Brain Stimul.* 6, 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.05.014>
- Meyer, P., Friederich, H., Zastrow, A., 2018. Breathe to ease - Respiratory biofeedback to improve heart rate variability and coping with stress in obese patients: A pilot study. *Ment. Heal. Prev.* 11, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.mhp.2018.06.001>
- Mikosch, P., Hadrawa, T., Laubreiter, K., Brandl, J., Pilz, J., Stettner, H., Grimm, G., 2010. Effectiveness of respiratory-sinus-

- arrhythmia biofeedback on state-anxiety in patients undergoing coronary angiography. *J. Adv. Nurs.* 66, 1101–1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2010.05277.x>
- Miller, E.K., Cohen, J.D., 2001. An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annu. Rev. Neurosci.* 24, 167–202.
- Miranda, P.C., Lomarev, M., Hallett, M., 2006. Modeling the current distribution during transcranial direct current stimulation. *Clin. Neurophysiol.* 117, 1623–1629. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.009>
- Mirnics, Z., Heincz, O., Bagdy, G., Surányi, Z., Gonda, X., Benko, A., Molnar, E., Jakšić, N., Lazary, J., Juhasz, G., 2013. The relationship between the big five personality dimensions and acute psychopathology: Mediating and moderating effects of coping strategies. *Psychiatr. Danub.* 25, 379–388.
- Moran, A., MacIntyre, T., 1998. There's more to an image than meets the eye': A qualitative study of kinaesthetic imagery among elite canoe-slalomists. *Irish J. Psychol.* 19, 406–423. <https://doi.org/10.1080/03033910.1998.10558203>
- Moutinho, I.L.D., De Castro Pecci Maddalena, N., Roland, R.K., Lucchetti, A.L.G., Tibiriçá, S.H.C., Da Silva Ezequiel, O., Lucchetti, G., 2017. Depression, stress and anxiety in medical students: A cross-sectional comparison between students from different semesters. *Rev Assoc Med Bra* 63, 21–28. <https://doi.org/10.1590/1806-9282.63.01.21>
- Muller, L., Spitz, E., 2003. Évaluation multidimensionnelle du coping: Validation du Brief COPE sur une population française. *Encephale* 29, 507–518.
- Musa, C., Kostogianni, N., Lépine, J.-P., 2004. Échelle de peur de l'évaluation négative (FNE) : propriétés psychométriques de la traduction française. *Encephale*. 30, 517–524. [https://doi.org/10.1016/s0013-7006\(04\)95465-6](https://doi.org/10.1016/s0013-7006(04)95465-6)
- Nasseri, P., Nitsche, M.A., Ekhtiari, H., 2015. A framework for categorizing electrode montages in transcranial direct current stimulation. *Front. Hum. Neurosci.* 9, 1–5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00054>
- Nater, U.M., La Marca, R., Florin, L., Moses, A., Langhans, W., Koller, M.M., Ehlert, U., 2006. Stress-induced changes in human salivary alpha-amylase activity - Associations with adrenergic activity. *Psychoneuroendocrinology* 31, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2005.05.010>
- Neupert, S.D., Ennis, G.E., Ramsey, J.L., Gall, A.A., 2016. Solving tomorrow's problems today? Daily anticipatory coping and reactivity to daily stressors. *Journals Gerontol. - Ser. B Psychol. Sci. Soc. Sci.* 71, 650–660. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbv003>
- Nielsen, B., Harder, N., 2013. Causes of student anxiety during simulation: What the literature says. *Clin. Simul. Nurs.* 9, e507–e512. <https://doi.org/10.1016/j.ecns.2013.03.003>
- Nitsche, M.A., Boggio, P.S., Fregni, F., Pascual-Leone, A., 2009. Treatment of depression with transcranial direct current stimulation (tDCS): A Review. *Exp. Neurol.* 219, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2009.03.038>
- Nogawa, M., Yamakoshi, T., Ikarashi, A., Tanaka, S., Yamakoshi, K., 2007. Assessment of Slow-breathing Relaxation Technique in Acute Stressful Tasks Using a Multipurpose Non-invasive Beat-by-Beat Cardiovascular Monitoring System. *Proc. 29th Annu. Int. Conf. IEEE EMBS* 1, 5323–5325.
- Nolen-Hoeksema, S., Wisco, B.E., Lyubomirsky, S., 2008. Rethinking Rumination. *Perspect. Psychol. Sci.* 3, 400–424. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6924.2008.00088.x>
- Northern, J.J., 2010. Anxiety and cognitive performance: a test of predictions made by cognitive interference theory and attentional control theory. College of Bowling Green.
- Nursej, J., Phelps, A.J., 2016. Stress, Trauma, and Memory in PTSD. *Stress Concepts, Cogn. Emot. Behav. Handb. Stress* 169–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800951-2.00020-0>
- Nyklíček, I., Irrmischer, M., 2017. For Whom Does Mindfulness-Based Stress Reduction Work? Moderating Effects of Personality. *Mindfulness (N. Y.)*. 8, 1106–1116. <https://doi.org/10.1007/s12671-017-0687-0>
- O'Shea, H., Moran, A., 2017. Does motor simulation theory explain the cognitive mechanisms underlying motor imagery? A critical review. *Front. Hum. Neurosci.* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00072>
- O'Súilleabháin, P.S., Hughes, B.M., Oommen, A.M., Joshi, L., Cunningham, S., 2019. Vulnerability to stress: Personality facet of vulnerability is associated with cardiovascular adaptation to recurring stress. *Int. J. Psychophysiol.* 144, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.06.013>
- Ó Súilleabháin, P.S., Howard, S., Hughes, B.M., 2018. Openness to experience and adapting to change: Cardiovascular stress habituation to change in acute stress exposure. *Psychophysiology* 55. <https://doi.org/10.1111/psyp.13023>
- Oei, N.Y.L., Everaerd, W.T.A.M., Elzinga, B.M., van Well, S., Bermond, B., 2006. Psychosocial stress impairs working memory

- at high loads: An association with cortisol levels and memory retrieval. *Int. J. Biol. Stress* 9, 133–141. <https://doi.org/10.1080/10253890600965773>
- Ohn, S.H., Park, C., Yoo, W.K., Ko, M.H., Choi, K.P., Kim, G.M., Lee, Y.T., Kim, Y.H., 2008. Time-dependent effect of transcranial direct current stimulation on the enhancement of working memory. *Neuroreport* 19, 43–47. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282f2adfd>
- Osuagwu, B.A., Vuckovic, A., 2014. Similarities between explicit and implicit motor imagery in mental rotation of hands: An EEG study. *Neuropsychologia* 65, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.029>
- Panagioti, M., Geraghty, K., Johnson, J., Zhou, A., Panagopoulou, E., Chew-Graham, C., Peters, D., Hodkinson, A., Riley, R., Esmail, A., 2018. Association between Physician Burnout and Patient Safety, Professionalism, and Patient Satisfaction: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Intern. Med.* 178, 1317–1330. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2018.3713>
- Pardine, P., Napoli, A., 1977. Personality correlates of successful biofeedback training. *Percept. Mot. Skills* 45, 1099–1103. <https://doi.org/10.2466/pms.1977.45.3f.1099>
- Paret, C., Kluetsch, R., Ruf, M., Demirakca, T., Hoesterey, S., Ende, G., Schmahl, C., 2014. Down-Regulation of amygdala activation with Real-Time fmri neurofeedback in a healthy female sample. *Front. Behav. Neurosci.* 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00299>
- Parsons, L.M., Fox, P.T., Downs, J.H., Glass, T., Hirsch, T.B., Martin, C.C., Jerabek, P.A., Lancaster, J.L., 1995. Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/375054a0>
- Peciuliene, I., Perminas, A., Gustainiene, L., Jarasiunaite, G., 2015. Effectiveness of Progressive Muscle Relaxation and Biofeedback Relaxation in Lowering Physiological Arousal among Students with Regard to Personality Features. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 205, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.09.064>
- Peña-Gómez, C., Vidal-Piñeiro, D., Clemente, I.C., Pascual-Leone, Á., Bartrés-Faz, D., 2011. Down-regulation of negative emotional processing by transcranial direct current stimulation: Effects of personality characteristics. *PLoS One* 6, e22812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022812>
- Penley, J., Tomaka, J., 2002. Associations among the Big Five, emotional responses, and coping with acute stress. *Pers. Individ. Dif.* 32, 1215–1228. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(01)00087-3)
- Perreaut-Pierre Edith, 2016. *Comprendre et pratiquer les Techniques d'Optimisation du Potentiel*, Interediti. ed.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., 2014. *Linear and nonlinear mixed effects models*. R Packag. Version 3.
- Plaisant, O., Courtois, R., Réveillère, C., Mendelsohn, G.A., John, O.P., 2010. Validation par analyse factorielle du Big Five Inventory français (BFI-Fr). Analyse convergente avec le NEO-PI-R. *Ann. Med. Psychol. (Paris)*. 168, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2009.09.003>
- Plans, D., Morelli, D., Sütterlin, S., Ollis, L., Derbyshire, G., Cropley, M., 2019. Use of a biofeedback breathing app to augment poststress physiological recovery: Randomized pilot study. *J. Med. Internet Res.* 21, 1–8. <https://doi.org/10.2196/12227>
- Plessow, F., Schade, S., Kirschbaum, C., Fischer, R., 2012. Better not to deal with two tasks at the same time when stressed ? Acute psychosocial stress reduces task shielding in dual-task performance. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 12, 557–570. <https://doi.org/10.3758/s13415-012-0098-6>
- Poiroux, E., Cavaro-Ménard, C., Leruez, S., Lemée, J.M., Richard, I., Dinomais, M., 2015. What do eye gaze metrics tell us about motor imagery? *PLoS One* 10, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143831>
- Porcelli, A.J., Cruz, D., Wenberg, K., Patterson, M.D., Biswal, B.B., Rypma, B., 2008. The effects of acute stress on human prefrontal working memory systems. *Physiol. Behav.* 95, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2008.04.027>
- Posada-Quintero, H.F., Chon, K.H., 2020. Innovations in electrodermal activity data collection and signal processing: A systematic review. *Sensors Rev.* 20, 479. <https://doi.org/10.3390/s20020479>
- Preston, S.D., Buchanan, T.W., Stansfield, R.B., Bechara, A., 2007. Effects of Anticipatory Stress on Decision Making in a Gambling Task. *Behav. Neurosci.* 121, 257–263. <https://doi.org/10.1037/0735-7044.121.2.257>
- Prinsloo, G.E., Derman, W.E., Lambert, M.I., Laurie Rauch, H.G., 2013. The effect of a single session of short duration biofeedback-induced deep breathing on measures of heart rate variability during laboratory-induced cognitive stress: A pilot study. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 38, 81–90. <https://doi.org/10.1007/s10484-013-9210-0>
- Prinsloo, G.E., Rauch, H.G.L., Lambert, M.I., Muench, F., Noakes, T.D., Derman, W.E., 2011. The effect of short duration heart

- rate variability (HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Appl. Cogn. Psychol.* 25, 792–801. <https://doi.org/10.1002/acp.1750>
- Pruessner, J.C., Baldwin, M.W., Dedovic, K., Renwick, R., Mahani, N.K., Lord, C., Meaney, M., Lupien, S.J., 2005. Self-esteem, locus of control, hippocampal volume, and cortisol regulation in young and old adulthood. *Neuroimage* 28, 815–826. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.06.014>
- Pruessner, J.C., Dedovic, K., Khalili-mahani, N., Engert, V., Pruessner, M., Buss, C., Renwick, R., Dagher, A., Meaney, M.J., Lupien, S.J., 2008. Deactivation of the Limbic System During Acute Psychosocial Stress : Evidence from Positron Emission Tomography and Functional Magnetic Resonance Imaging Studies. *Biol. Psychiatry* 63, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.04.041>
- Pruessner, J.C., Dedovic, K., Pruessner, M., Lord, C., Buss, C., Collins, L., Dagher, A., Lupien, S.J., 2009. Stress regulation in the central nervous system : evidence from structural and functional neuroimaging studies in human populations - 2008 Curt Richter Award Winner. *Psychoneuroendocrinology* 35, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2009.02.016>
- Pulopulos, M.M., Baeken, C., De Raedt, R., 2020. Cortisol response to stress: The role of expectancy and anticipatory stress regulation. *Horm. Behav.* 117, 104587. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2019.104587>
- Pulopulos, M.M., DeWitte, S., Vanderhasselt, M.A., DeRaedt, R., Schiettecatte, J., Anckaert, E., Salvador, A., Baeken, C., 2019. The influence of personality on the effect of iTBS after being stressed on cortisol secretion. *PLoS One* 14, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223927>
- Pulopulos, M.M., Vanderhasselt, M.A., De Raedt, R., 2018. Association between changes in heart rate variability during the anticipation of a stressful situation and the stress-induced cortisol response. *Psychoneuroendocrinology* 94, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2018.05.004>
- Qamar Khadija, Khan, N.S., Kiani, M.R.B., 2015. Factors associated with stress among medical students. *Jpma* 3. <https://doi.org/10.9790/1959-04663338>
- Qin, S., Hermans, E.J., Marle, H.J.F. Van, Luo, J., Fernández, G., 2009. Acute Psychological Stress Reduces Working Memory-Related Activity in the Dorsolateral Prefrontal Cortex. *Biol. Psychiatry* 66, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.03.006>
- Quaedflieg, C.W.E.M., Van De Ven, V., Meyer, T., Siep, N., Merckelbach, H., Smeets, T., 2015. Temporal dynamics of stress-induced alternations of intrinsic amygdala connectivity and neuroendocrine levels. *PLoS One* 10, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124141>
- Ratanasiripong, P., Park, J.F., Ratanasiripong, N., Kathalae, D., 2015. Stress and Anxiety Management in Nursing Students : Biofeedback and Mindfulness Meditation. *J. Nurs. Educ.* 54, 520–524. <https://doi.org/10.3928/01484834-20150814-07>
- Reeve, P.E., 1983. Personality characteristics of anaesthetists. *Anaesthesia* 38, 395–396. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1983.tb10485.x>
- Reinhardt, T., Schmahl, C., Wüst, S., Bohus, M., 2012. Salivary cortisol, heart rate, electrodermal activity and subjective stress responses to the Mannheim Multicomponent Stress Test (MMST). *Psychiatry Res.* 198, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2011.12.009>
- Rekatsina, M., Paladini, A., Moka, E., Yeam, C.T., Urits, I., Viswanath, O., Kaye, A.D., Morgan, J.A., Varrassi, G., 2020. Healthcare at the time of COVID-19: A review of the current situation with emphasis on anesthesia providers. *Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol.* 34, 539–551. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2020.07.002>
- Richmond, L.L., Wolk, D., Chein, J., Olson, I.R., 2014. Transcranial Direct Current Stimulation Enhances Verbal Working Memory Training Performance over Time and Near Transfer Outcomes. *J. Cogn. Neurosci.* 26, 2443–2454. <https://doi.org/10.1162/jocn>
- Rieger, A., Stoll, R., Kreuzfeld, S., Behrens, K., Weippert, M., 2014. Heart rate and heart rate variability as indirect markers of surgeons' intraoperative stress. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 87, 165–174. <https://doi.org/10.1007/s00420-013-0847-z>
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., Bringer, J., 2008. Movement Imagery Ability: Development and Assessment of a Revised Version of the Vividness of Movement Imagery Questionnaire. *J. Sport Exerc. Psychol.* 30, 200–221.
- Robinson, D.N., 2019. Learning to relax: The Impact of Brief Biofeedback Training on Salivary Cortisol Reduction. MSU Graduate Theses. <https://doi.org/10.1007/s12144-021-02036-4>
- Roosendaal, B., McEwen, B.S., Chattarji, S., 2009. Stress, memory and the amygdala. *Nat. Rev. Neurosci.* 10, 423–433. <https://doi.org/10.1038/nrn2651>

- Rozisky, J.R., da Conceição Antunes, L., Brietzke, A.P., de Sousa, A.C., Caumo, W., 2016. Transcranial direct current stimulation and neuroplasticity. *Transcranial Direct Curr. Stimul. Emerg. Uses, Saf. Neurobiol. Eff.* 1–26.
- Saboul, D., 2013. Apports de la variabilité de la fréquence cardiaques dans l'évaluation de la charge d'entraînement et le suivi d'athlètes : aspects méthodologiques et applications pratiques.
- Sanchez, A., Vazquez, C., Marker, C., LeMoult, J., Joormann, J., 2013. Attentional disengagement predicts stress recovery in depression: An eye-tracking study. *J. Abnorm. Psychol.* 122, 303–313. <https://doi.org/10.1037/a0031529>
- Sandi, C., 2013. Stress and cognition. *WIREs Cogn Sci* 4, 245–261. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00081-4>
- Sanfilippo, F., Noto, A., Foresta, G., Santonocito, C., Palumbo, G.J., Arcadipane, A., Maybauer, D.M., Maybauer, M.O., 2017. Incidence and factors associated with burnout in anesthesiology: A systematic review. *Biomed Res. Int.* <https://doi.org/10.1155/2017/8648925>
- Sänger, J., Bechtold, L., Schoofs, D., Blaszkewicz, M., Wascher, E., 2014. The influence of acute stress on attention mechanisms and its electrophysiological correlates. *Front. Behav. Neurosci.* 8, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00353>
- Sapolsky, R., Krey, L., McEwen, B.S., 1986. The Neuroendocrinology of Stress and Aging: The Glucocorticoid Cascade Hypothesis. *Endocr. Rev.* 7, 284–301.
- Saravanan, C., Wilks, R., 2014. Medical students' experience of and reaction to stress: the role of depression and anxiety. *Sci. World J.* 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/737382>
- Savic, I., 2015. Structural changes of the brain in relation to occupational stress. *Cereb. Cortex* 25, 1554–1564. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht348>
- Scarpina, F., Tagini, S., 2017. The stroop color and word test. *Front. Psychol.* 8, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00557>
- Schell, R.M., Dilorenzo, A.N., Li, H.F., Fragneto, R.Y., Bowe, E.A., Hessel, E.A., 2012. Anesthesiology resident personality type correlates with faculty assessment of resident performance. *J. Clin. Anesth.* 24, 566–572. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2012.04.008>
- Schlatter, S., Guillot, A., Faes, C., Saruco, E., Collet, C., Di Rienzo, F., Debarnot, U., 2020. Acute stress affects implicit but not explicit motor imagery: A pilot study. *Int. J. Psychophysiol.* 152, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.04.011>
- Schlatter, S., Schmidt, L., Lilot, M., Guillot, A., Debarnot, U., 2021. Implementing biofeedback as a proactive coping strategy: psychological and physiological effects on anticipatory stress. *Behav. Res. Ther.* 103834. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103834>
- Schneider, T.R., 2004. The role of neuroticism on psychological and physiological stress responses. *J. Exp. Soc. Psychol.* 40, 795–804. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2004.04.005>
- Schneider, T.R., Rench, T.A., Lyons, J.B., Riffle, R.R., 2012. The influence of neuroticism, extraversion and openness on stress responses. *Stress Heal.* 28, 102–110. <https://doi.org/10.1002/smi.1409>
- Schoofs, D., Preuß, D., Wolf, O.T., 2008. Psychosocial stress induces working memory impairments in an n-back paradigm. *Psychoneuroendocrinology* 33, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.02.004>
- Schroeder, P.A., Ehlis, A.-C., Wolkenstein, L., Fallgatter, A.J., Plewnia, C., 2015. Emotional Distraction and Bodily Reaction : Modulation of Autonomous Responses by Anodal tDCS to the Prefrontal Cortex. *Front. Cellular Neurosci.* 9, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fncel.2015.00482>
- Schuster, C., Hilfiker, R., Amft, O., Scheidhauer, A., Andrews, B., Butler, J., Kischka, U., Ettlin, T., 2011. Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. *BMC Med.* 75, 1–35.
- Schwabe, L., Oitzl, M.S., Philippson, C., Richter, S., Bohringer, A., Wippich, W., Schachinger, H., 2007. Stress modulates the use of spatial versus stimulus-response learning strategies in humans. *Learn. Mem.* 14, 109–116. <https://doi.org/10.1101/lm.435807>
- Schwabe, L., Römer, S., Richter, S., Dockendorf, S., Bilak, B., Schächinger, H., 2009. Stress effects on declarative memory retrieval are blocked by a  $\beta$ -adrenoceptor antagonist in humans. *Psychoneuroendocrinology* 34, 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.10.009>
- Selye, H., 1936. A Syndrome produced by Divers Nocuous Agents. *Nature* 1936, 32.
- Sevdalis, N., Moran, A., Arora, S., 2014. Mental Imagery and Mental Practice Applications in Surgery: State of the Art and

- Future Directions, in: *Multisensory Imagery*. Dublin, pp. 343–363. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5879-1>
- Shackman, A.J., Sarinopoulos, I., Maxwell, J.S., Pizzagalli, D.A., Lavric, A., Davidson, R.J., 2006. Anxiety Selectively Disrupts Visuospatial Working Memory. *Emotion* 6, 40–61. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.1.40>
- Shaffer, F., Ginsberg, J.P., 2017. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front. Public Heal.* 5, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Shaffer, F., McCraty, R., Zerr, C.L., 2014. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front. Psychol.* 5, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>
- Sherina, M.S., Rampal, L., Kaneson, N., 2004. Psychological stress among undergraduate medical students. *Med. J. Malaysia* 59, 207–211.
- Sherlin, L., Gevirtz, R., Wyckoff, S., Muench, F., 2009. Effects of Respiratory Sinus Arrhythmia Biofeedback Versus Passive Biofeedback Control. *Int. J. Stress Manag.* 16, 233–248. <https://doi.org/10.1037/a0016047>
- Sherlin, L., Muench, F., Wyckoff, S., 2010. Respiratory Sinus Arrhythmia Feedback in a Stressed Population Exposed to a Brief Stressor Demonstrated by Quantitative EEG and sLORETA. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 35, 219–228. <https://doi.org/10.1007/s10484-010-9132-z>
- Shewchuk, R.M., Elliott, T.R., Macnair-Semands, R.R., Harkins, S., 1999. Trait Influences on Stress Appraisal and Coping: An Evaluation of Alternative Frameworks. *J. Appl. Soc. Psychol.* 29, 685–704. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1999.tb02019.x>
- Shields, G.S., Sazma, M.A., McCullough, A.M., Yonelinas, A.P., 2017. The Effects of Acute Stress on Episodic Memory : A Meta-Analysis and Integrative Review. *Psychol. Bull.* 143, 636–675. <https://doi.org/10.1037/bul0000100>
- Shields, G.S., Slavich, G.M., 2017. Lifetime stress exposure and health: A review of contemporary assessment methods and biological mechanisms. *Soc. Personal. Psychol. Compass* 11, 1–17. <https://doi.org/10.1111/spc3.12335>
- Shiozawa, P., Fregni, F., Benseñor, I.M., Lotufo, P.A., Berlim, M.T., Daskalakis, J.Z., Cordeiro, Q., Brunoni, A.R., 2014. Transcranial direct current stimulation for major depression: An updated systematic review and meta-analysis. *Int. J. Neuropsychopharmacol.* 17, 1443–1452. <https://doi.org/10.1017/S1461145714000418>
- Siassakos, D., Hasafa, Z., Sibanda, T., Fox, R., Donald, F., Winter, C., Draycott, T., 2009. Retrospective cohort study of diagnosis-delivery interval with umbilical cord prolapse: The effect of team training. *BJOG An Int. J. Obstet. Gynaecol.* 116, 1089–1096. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.2009.02179.x>
- Siepmann, M., Aykac, V., Unterdörfer, J., Petrowski, K., Mueck-Weymann, M., 2008. A pilot study on the effects of heart rate variability biofeedback in patients with depression and in healthy subjects. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 33, 195–201. <https://doi.org/10.1007/s10484-008-9064-z>
- Sigwalt, F., Petit, G., Evain, J.N., Claverie, D., Bui, M., Guinet-Lebreton, A., Trousselard, M., Canini, F., Chassard, D., Duclos, A., Lehot, J.-J., Rimmelé, T., Lilot, M., 2020. Stress management training improves overall performance during critical simulated situations: A prospective randomized controlled trial. *Anesthesiology* 198–211. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000003287>
- Sinha, R., Lacadie, C., Skudlarski, P., Wexler, B.E., 2004. Neural circuits underlying emotional distress in humans. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1032, 254–257. <https://doi.org/10.1196/annals.1314.032>
- Skoluda, N., Strahler, J., Schlotz, W., Niederberger, L., Marques, S., Fischer, S., Thoma, M. V., Spoerri, C., Ehlert, U., Nater, U.M., 2015. Intra-individual psychological and physiological responses to acute laboratory stressors of different intensity. *Psychoneuroendocrinology* 51, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.10.002>
- Smeets, T., Jellic, M., Merckelbach, H., Peters, M., Fett, A., Taverniers, J., Henquet, C., Dautzenberg, J., 2006. Enhanced memory performance on an internal-internal source monitoring test following acute psychosocial stress. *Behav. Neurosci.* 120, 1204–1210. <https://doi.org/10.1037/0735-7044.120.6.1204>
- Soliemanifar, O., Soleymanifar, A., Afrisham, R., 2018. Relationship between Personality and Biological Reactivity to Stress: A Review. *Psychiatry Investig.* 15, 1100–1114. <https://doi.org/10.30773/pi.2018.10.14.2>
- Song, Y., Lindquist, R., 2015. Effects of mindfulness-based stress reduction on depression, anxiety, stress and mindfulness in Korean nursing students. *Nurse Educ. Today* 35, 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2014.06.010>
- Sonnenschein, M., Sorbi, M.J., van Doornen, L.J.P., Schaufeli, W.B., Maas, C.J.M., 2007. Evidence that impaired sleep recovery may complicate burnout improvement independently of depressive mood. *J. Psychosom. Res.* 62, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2006.11.011>

- Sousa, N., Cerqueira, J.J., Almeida, O.F.X., 2008. Corticosteroid receptors and neuroplasticity. *Brain Res. Rev.* 57, 561–570. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2007.06.007>
- Soyata, A.Z., Aksu, S., Woods, A.J., İşçen, P., Saçar, K.T., Karamürsel, S., 2018. Effect of transcranial direct current stimulation on decision making and cognitive flexibility in gambling disorder. *Eur. Arch. Psychiatry Clin. Neurosci.* 269, 275–284. <https://doi.org/10.1007/s00406-018-0948-5>
- Spielberger, C., Gorsuch, R., Lushene, P., Vagg, P., Jacobs, A., 1983. *Manual for the State Trait Anxiety Inventory (Form Y)*. Consulting Psychologists Press., Palo Alto, CA.
- Staal, M.A., 2004. *Stress, Cognition, and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework*. Moffett Field, California.
- Starcke, K., Wiesen, C., Trotske, P., Brand, M., 2016. Effects of acute laboratory stress on executive functions. *Front. Psychol.* 7, 461. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00461>
- Starcke, K., Wolf, O.T., Markowitsch, H.J., Brand, M., 2008. Anticipatory Stress Influences Decision Making Under Explicit Risk Conditions. *Behav. Neurosci.* 122, 1352–1360. <https://doi.org/10.1037/a0013281>
- Stillwell, S.B., Vermeesch, A.L., Scott, J.G., 2017. Interventions to Reduce Perceived Stress Among Graduate Students: A Systematic Review With Implications for Evidence-Based Practice. *Worldviews Evidence-Based Nurs.* 14, 507–513. <https://doi.org/10.1111/wvn.12250>
- Stoet, G., 2017. PsyToolkit: A Novel Web-Based Method for Running Online Questionnaires and Reaction-Time Experiments. *Teach. Psychol.* 44, 24–31. <https://doi.org/10.1177/0098628316677643>
- Stoet, G., 2010. PsyToolkit: A software package for programming psychological experiments using Linux. *Behav. Res. Methods* 42, 1096–1104. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.4.1096>
- Strobach, T., Antonenko, D., 2016. tDCS-Induced Effects on Executive Functioning and Their Cognitive Mechanisms: a Review. *J. Cogn. Enhanc.* 1, 49–64. <https://doi.org/10.1007/s41465-016-0004-1>
- Strobach, T., Soutschek, A., Antonenko, D., Flöel, A., Schubert, T., 2015. Modulation of executive control in dual tasks with transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuropsychologia* 68, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.12.024>
- Subhani, A.R., Kamel, N., Saad, M.N.M., Nandagopal, N., Kang, K., Malik, A.S., 2018. Mitigation of stress: new treatment alternatives. *Cogn. Neurodyn.* 12, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11571-017-9460-2>
- Taverniers, J., Smeets, T., Lo Bue, S., Syroit, J., Van Ruyseveldt, J., Pattyn, N., Von Grumbkow, J., 2011. Visuo-spatial path learning, stress, and cortisol secretion following military cadets' first parachute jump: The effect of increasing task complexity. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 11, 332–343. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0043-0>
- Taverniers, J., Taylor, M.K., Smeets, T., 2013. Delayed memory effects after intense stress in Special Forces candidates: Exploring path processes between cortisol secretion and memory recall. *Stress* 16, 311–320. <https://doi.org/10.3109/10253890.2012.721824>
- Taverniers, J., Van Ruyseveldt, J., Smeets, T., Von Grumbkow, J., 2010. High-intensity stress elicits robust cortisol increases, and impairs working memory and visuo-spatial declarative memory in Special forces candidates: A field experiment. *Stress* 13, 323–333. <https://doi.org/10.3109/10253891003642394>
- Thair, H., Holloway, A.L., Newport, R., Smith, A.D., 2017. Transcranial direct current stimulation (tDCS): A Beginner's guide for design and implementation. *Front. Neurosci.* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00641>
- Thayer, J.F., Åhs, F., Fredrikson, M., Sollers, J.J., Wager, T.D., 2012. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies : Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 36, 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
- Thayer, R.E., 1989. *The biopsychology of mood and arousal*, in: Oxford University Press. New York.
- Thayer, R.E., 1978. Factor analytic and reliability studies on the activation\_deactivation adjective check list. *Psychol. Rep.* 42, 747–756.
- Thayer, R.E., 1967. Measurement of activation through self-report. *Psychol. Rep.* 20, 663–678. <https://doi.org/10.2466/pr0.1967.20.2.663>
- Thibaut, A., Chatelle, C., Gosseries, O., Laureys, S., Bruno, M.A., 2013. La stimulation transcrânienne à courant continu : un nouvel outil de neurostimulation. *Rev. Neurol. (Paris)*. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2012.05.008>



- Tonhajzerova, I., Mestanik, M., 2017. New Perspectives in the Model of Stress Response. *Physiol. Res.* 66, S173–S185.
- Traber, D., Atzeni, T., Pellissier, S., Le Barbenchon, E., 2020. The structure and properties of the Coping Flexibility Scale: Validation in French population. *Ann. Med. Psychol. (Paris)*. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2020.11.002>
- Treiber, F.A., Kamarck, T., Schneiderman, N., Sheffield, D., Kapuku, G., Taylor, T., 2003. Cardiovascular reactivity and development of preclinical and clinical disease states. *Psychosom. Med.* 65, 46–62. <https://doi.org/10.1097/00006842-200301000-00007>
- Trousselard, M., Dutheil, F., Ferrer, M.H., Babouraj, N., Canini, F., 2015. Tactics to optimize the potential and CardioBioFeedback in stress management: The French experience. *Med. Acupunct.* 27, 367–375. <https://doi.org/10.1089/acu.2014.1052>
- Tuckey, M.R., Scott, J.E., 2014. Group critical incident stress debriefing with emergency services personnel: A randomized controlled trial. *Anxiety, Stress Coping* 27, 38–54. <https://doi.org/10.1080/10615806.2013.809421>
- Vacher, P., Filaire, E., Mourot, L., Nicolas, M., 2019. Stress and recovery in sports: Effects on heart rate variability, cortisol, and subjective experience. *Int. J. Psychophysiol.* 143, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.06.011>
- Valentin, B., Grottko, O., Skorning, M., Bergrath, S., Fischermann, H., Rörtgen, D., Mennig, M.T., Fitzner, C., Müller, M.P., Kirschbaum, C., Rossaint, R., Beckers, S.K., 2015. Cortisol and alpha-amylase as stress response indicators during pre-hospital emergency medicine training with repetitive high-fidelity simulation and scenarios with standardized patients. *Scand. J. Trauma. Resusc. Emerg. Med.* 23, 1–8. <https://doi.org/10.1186/s13049-015-0110-6>
- Van Der Wal, R.A.B., Bucx, M.J.L., Hendriks, J.C.M., Scheffer, G.J., Prins, J.B., 2016. Psychological distress, burnout and personality traits in Dutch anaesthesiologists. *Eur. J. Anaesthesiol.* 33, 179–186. <https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000000375>
- Van Der Wal, R.A.B., Wallage, J., Bucx, M.J.L., 2018. Occupational stress, burnout and personality in anesthesiologists. *Curr. Opin. Anaesthesiol.* 31, 351–356. <https://doi.org/10.1097/ACO.0000000000000587>
- Van Oort, J., Tendolkar, I., Hermans, E.J., Mulders, P.C., Beckmann, C.F., Schene, A.H., Fernández, G., van Eijndhoven, P.F., 2017. How the brain connects in response to acute stress: A review at the human brain systems level. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 83, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.015>
- Van Paridon, K.N., Timmis, M.A., Nevison, C.M., Bristow, M., 2017. The anticipatory stress response to sport competition; A systematic review with meta-analysis of cortisol reactivity. *BMJ Open Sport Exerc. Med.* 3, 1–11. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2017-000261>
- VanDiest, I., Verstappen, K., Aubert, A.E., Widjaja, D., Vansteenwegen, D., Vlemincx, E., 2014. Inhalation/Exhalation Ratio Modulates the Effect of Slow Breathing on Heart Rate Variability and Relaxation. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 39, 171–180. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9253-x>
- Vaschillo, E.G., 1984. Dynamics of slow-wave cardiac rhythm structure as an index of the functional state of an operant. Leningrad State University, Russi.
- Vermesch, P., 2019. *L'entretien d'explicitation*, 9ème édit. ed. Paris.
- Vignes, J.-R., Rogues, A.-M., Moreau, J.-J., 2013. L'image mentale peut-elle améliorer l'apprentissage d'un geste chirurgical ? L'exemple de la désinfection des mains. *Pédagogie Médicale* 14, 99–105. <https://doi.org/10.1051/pmed/2013045>
- Vine, S.J., Moore, L.J., Wilson, M.R., Martin, B.J., 2016. An Integrative Framework of Stress, Attention, and Visuomotor Performance. *Front. Psychol.* 7, 1671. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01671>
- Vinski, M.T., Watter, S., 2013. Being a grump only makes things worse: A transactional account of acute stress on mind wandering. *Front. Psychol.* 4, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00730>
- Vogel, S., Fernández, G., Joëls, M., Schwabe, L., 2016. Cognitive Adaptation under Stress: A Case for the Mineralocorticoid Receptor. *Trends Cogn. Sci.* 20, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.12.003>
- Wagner, S., Rampersad, S.M., Aydin, Ü., Vorwerk, J., Oostendorp, T.F., Neuling, T., Herrmann, C.S., Stegeman, D.F., Wolters, C.H., 2014. Investigation of tDCS volume conduction effects in a highly realistic head model. *J. Neural Eng.* 11, 016002. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/1/016002>
- Watson, D., Hubbard, B., 1996. Adaptational Style and Dispositional Structure: Coping in the Context of the Five-Factor Model. *J. Pers.* 64, 737–774. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1996.tb00943.x>
- Wells, R., Outhred, T., Heathers, J.A.J., Quintana, D.S., Kemp, A.H., 2012. Matter Over Mind: A Randomised-Controlled Trial of Single-Session Biofeedback Training on Performance Anxiety and Heart Rate Variability in Musicians. *PLoS One* 7,

e46597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046597>

- Whited, A., Larkin, K.T., Whited, M., 2014. Effectiveness of emWave biofeedback in improving heart rate variability reactivity to and recovery from stress. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 39, 75–88. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9243-z>
- Williams, P.G., Rau, H.K., Cribbet, M.R., Gunn, H.E., 2009. Openness to Experience and stress regulation. *J. Res. Pers.* 43, 777–784. <https://doi.org/10.1016/j.jrp.2009.06.003>
- Williams, P.G., Smith, T.W., Gunn, H.E., Uchino, B.N., 2010. Personality and Stress: Individual Differences in Exposure, Reactivity, Recovery, and Restoration, in: Contrada, R.J., Baum, A. (Eds.), *The Handbook of Stress Science : Biology, Psychology, and Health*. New York, pp. 231–245.
- Williams, S.E., Cumming, J., Ntoumanis, N., Nordin-Bates, S.M., Ramsey, R., Hall, C., 2012. Further validation and development of the movement imagery questionnaire. *J. Sport Exerc. Psychol.* 34, 621–646. <https://doi.org/10.1123/jsep.34.5.621>
- Wilson, M.R., Wood, G., Vine, S.J., 2009. Anxiety, attentional control, and performance impairment in penalty kicks. *J. Sport Exerc. Psychol.* 31, 761–775. <https://doi.org/10.1123/jsep.31.6.761>
- Wirkner, J., Weymar, M., Löw, A., Hamm, A.O., 2013. Effects of Pre-Encoding Stress on Brain Correlates Associated with the Long-Term Memory for Emotional Scenes. *PLoS One* 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068212>
- Woodcock, E.A., Greenwald, M.K., Khatib, D., Diwadkar, V.A., Stanley, J.A., 2019. Pharmacological stress impairs working memory performance and attenuates dorsolateral prefrontal cortex glutamate modulation. *Neuroimage* 186, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.017>
- World Health Organization, 2020. Mental health and psychosocial considerations during the COVID-19 outbreak 1–6.
- World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects, 2003. . TAMA 310, 2191–2194. <https://doi.org/10.3917/jib.151.0124>
- Xin, Y., Wu, J., Yao, Z., Guan, Q., Aleman, A., Luo, Y., 2017. The relationship between personality and the response to acute psychological stress. *Sci. Rep.* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17053-2>
- Yang, H., Zhou, Z., Liu, Y., Ruan, Z., Gong, H., Luo, Q., Lu, Z., 2007. Gender difference in hemodynamic responses of prefrontal area to emotional stress by near-infrared spectroscopy. *Behav. Brain Res.* 178, 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2006.11.039>
- Zohar, A.H., Cloninger, C.R., McCraty, R., 2013. Personality and Heart Rate Variability: Exploring Pathways from Personality to Cardiac Coherence and Health. *Open J. Soc. Sci.* 01, 32–39. <https://doi.org/10.4236/jss.2013.16007>
- Zucker, T.L., Samuelson, K.W., Muench, F., Greenberg, M.A., Gevirtz, R.N., 2009. The effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback on heart rate variability and posttraumatic stress disorder symptoms: A pilot study. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 34, 135–143. <https://doi.org/10.1007/s10484-009-9085-2>

## 6.1. Définitions du stress et de l'anxiété

Un problème majeur des études sur le stress est la présence abondante, mais non consensuelle, de définition du stress et de l'anxiété. Bien que faisant appel à des concepts pourtant différents, de nombreuses études ont utilisé indifféremment les termes de stress et d'anxiété. Certaines définitions du stress abordent un aspect de la valence émotionnelle et donc discriminent le stress en quelque chose de positif ou négatif, d'autres caractérisent la longueur/l'intensité du stress (aigu *versus* chronique), enfin certaines proposent des degrés de spécificité différents (aspécifique, très spécifique, etc.). Les définitions présentées ci-dessous sont volontairement présentées en anglais afin d'éviter les biais d'interprétation inhérent au processus de traduction.

### 6.1.1. Définitions du stress

- Stress is a **non-specific response** of the body to any demand for change (called also General adaptation syndrome (Selye, 1936))
- Stress arises when individuals perceived that they cannot adequately cope with the demands being placed on them with threats to their well-being (Lazarus, 1966)
- Stress is an uncomfortable emotional experience accompanied by predictable biochemical, physiological and behavioral changes during challenging situations (Baum, 1990)
- Stress is the nonspecific adaptive response of the body to any change, demand, pressure, challenge, threat or trauma. The stress response is our attempt to maintain our status, to retain an equilibrium, to survive in a world that can be experienced as hostile, unpredictable, insensitive and unfair (Jackson, 1999)
- A process in which environmental demands tax or exceed the adaptive capacity of an organism, resulting in psychological and biological changes that may place a person at risk for disease (Cohen, Kessler & Gordon 1997)
- **Arousal** refers to a nondirective generalized bodily activation and is thought to range from a comatose state to a state of extreme excitement as might be manifested in a panic attack (Landers & Arent, 2001).
- **Stress/distress** is the psychological and hormonal response to environmental pressure (Putwain, 2007)
- An integrated definition states that stress is a constellation of events, consisting of a stimulus (stressor) that precipitates a reaction in the brain (stress perception and processing) and activates physiological flight or fight systems in the body (stress response) (Dhabhar, 2010)
- **Acute stress** has been defined as stress that lasts for a period of minutes to hours, and **chronic stress** as stress that persists for several hours per day for weeks or months (Dhabhar, 2010)
- It is possible to divide stress into **chronic** and **acute stress**. While acute stress sees the body prepare to defend itself, which lasts till the situation is over, chronic stressors are long-lasting and the sufferer does not know whether or when they end, or feels like they may never end (Shetter & Dolbier, 2011)
- Note that the term stress refers to both the perception of uncontrollable and unpredictable situations and the set of psychological, behavioral and physiological responses triggered by these perceptions (Koolhaus, 2011)
- The reactions of human organism to changes of internal or external environment as stress response (Tonhajzerova and Mestanik, 2017)

- Acute stress can be defined as the physical and psychological reaction when demands and pressures of a situation exceed an individual's perceived resources to cope. Although Landers and Arent recommend not using these terms interchangeably and conceptually distinguishing the terms as follows (Pijpers et al. 2004)
- Stress is seen as a result of demands placed on the individual that are perceived to exceed available coping abilities. Depending on one's interpretation of the environmental demands stress will be conceived as positive, negative, or neutral. The negative form of stress is called distress or anxiety and can have detrimental effects on performance (Pijpers et al. 2004)
- It is possible to divide stress into **chronic** and **acute stress**. While acute stress sees the body prepare to defend itself, which lasts till the situation is over, chronic stressors are long-lasting and the sufferer does not know whether or when they end, or feels like they may never end (Shetter & Dolbier, 2011)

### 6.1.2. Définitions de l'anxiété

- State anxiety is a transitory emotional state or condition characterized by subjective feelings of tension and apprehension and by activation of the autonomic nervous system (Spielberger et al. 1970)
- Anxiety occurs as a result of threat, and this threat is "related to the subjective evaluation of a situation, and concerns jeopardy to one's self-esteem during performance or social situations, physical danger, or insecurity and uncertainty" (Schwenkmezger & Steffgen, 1989)
- Anxiety is seen as directional in that it is an unpleasant emotional state (Woodman & Hardy, 2001)
- Anxiety is by definition a negative feeling state (Jones & Hanton, 2001)
- Anxiety has a mental element (e.g., worry, apprehension), which is called cognitive anxiety, and a physiological element that matches the construct of arousal as defined above and is called somatic anxiety (Martens, Vealey & Burton, 1990) or physiological arousal (Woodman & Hardy, 2001)
- Anxiety is the subjective psychological experience of environmental stressors which is marked by continued excessive worry, sleep abnormalities, difficulty concentrating, emotional lability, fatigue and restlessness.
- Anxiety is an aversive emotional and motivational state occurring in threatening circumstances (Eysenck et al. 2007)
- Anxiety has been defined as the response to uncertain or unpredictable threat, "a response which encompasses physiological, affective, and cognitive changes" (Robinson et al. 2013)

## 6.2. Modèle attentionnel (Vine et al. 2016)

### Integrative framework of stress, Attention, and Visuomotor Performance (Vine et al., 2016)

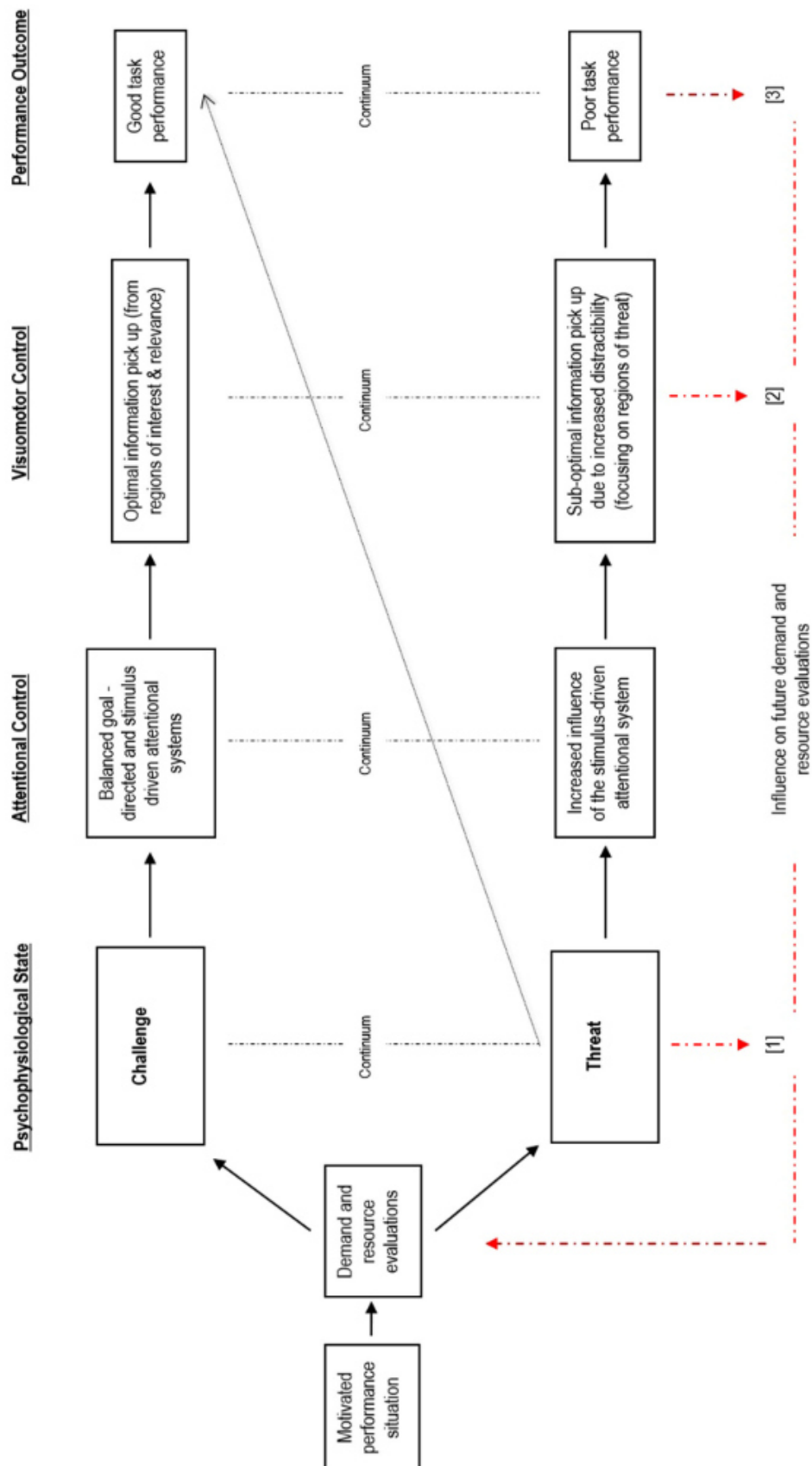


Figure 2. An integrative framework of stress, attention, and human performance. The rectangular boxes highlight the opposing psychophysiological responses to stress (challenge or threat state) that result from the demand and resource evaluation process, and their subsequent influence on attentional control and visuomotor performance. The diagonal dashed line represents compensatory strategies (e.g., increasing effort) that can be adopted to prevent a threat state from influencing performance. The red dashed lines represent the cyclical nature of evaluations of stress, and the influence of a threat state on future demand and resource evaluations

### 6.3. Questionnaire anxiété : STAI-T (Spielberger et al. 1983)

Un certain nombre de phrases que l'on utilise pour se décrire sont données ci-dessous. Lisez chaque phrase, puis marquez d'une croix, parmi les 4 points à droite, celui qui correspond le mieux à ce que vous ressentez **généralement**. Il n'y a pas de bonnes ni de mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur l'une ou l'autre de ces propositions et indiquez la réponse qui décrit le mieux vos sentiments **habituels**.

	Presque jamais	Parfois	Souvent	Presque toujours
21. Je me sens de bonne humeur, aimable. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22. Je me sens nerveux (nerveuse) et agité (e). _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23. Je me sens content(e) de moi. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24. Je voudrais être aussi heureux (heureuse) que les autres semblent l'être. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25. J'ai un sentiment d'échec. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26. Je me sens reposé(e). _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27. J'ai tout mon sang-froid. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28. J'ai l'impression que les difficultés s'accumulent à tel point que je ne peux plus les surmonter. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29. Je m'inquiète à propos de choses sans importance. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30. Je suis heureuse. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
31. J'ai des pensées qui me perturbent. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32. Je manque de confiance en moi. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
33. Je me sens sans inquiétude, en sécurité, en sûreté. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34. Je prends facilement des décisions. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
35. Je me sens incompetent(e), pas à la hauteur. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
36. Je suis satisfait(e). _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
37. Des idées sans importance trottant dans ma tête me dérangent. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
38. Je prends les déceptions tellement à cœur que je les oublie difficilement. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
39. Je suis une personne posée, solide, stable. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
40. Je deviens tendu(e) et agité(e) quand je réfléchis à mes soucis. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Questionnaire anxiété suite : STAI-E (Spielberger et al. 1983)

Un certain nombre de phrases que l'on utilise pour se décrire sont données ci-dessous. Lisez chaque phrase, puis cochez, parmi les 4 possibilités, celle qui correspond le mieux à ce que vous ressentez à l'instant présent. Répondez aussi franchement et spontanément que possible. Il n'y a pas de bonne ou mauvaise réponse. Ne passez pas trop de temps sur l'une ou l'autre de ces propositions et indiquez la réponse qui décrit le mieux votre situation **actuelle**.

	Non	Plutôt non	Plutôt oui	oui
1. Je me sens calme				
2. Je me sens en sécurité, sans inquiétude, en sûreté				
3. Je suis tendu(e), crispé(e)				
4. Je me sens surmené(e)				
5. Je me sens tranquille, bien dans ma peau				
6. Je me sens ému(e), bouleversé(e), contrarié(e)				
7. L'idée de malheurs éventuels me tracasse en ce moment				
8. Je me sens content(e)				
9. Je me sens effrayé(e)				
10. Je me sens à mon aise (je me sens bien)				
11. Je sens que j'ai confiance en moi				
12. Je me sens nerveux (nerveuse), irritable				
13. J'ai la frousse, la trouille (j'ai peur)				
14. Je me sens indécis(e)				
15. Je suis décontracté(e), détendu(e)				
16. Je suis satisfait(e)				
17. Je suis inquiet, soucieux (inquiète, soucieuse)				
18. Je ne sais plus où j'en suis, je me sens déconcerté(e), dérouté(e)				
19. Je me sens solide, posé(e), pondéré(e), réfléchi(e)				
20. Je me sens de bonne humeur, aimable				

#### 6.4. Questionnaire activation-désactivation : AD-ACL (Thayer, 1967)

Un certain nombre d'adjectifs sont listés ci-dessous. Lisez chacun d'entre eux et répondez rapidement en cochant la case figurant à la droite de chaque adjectif qui vous paraît le mieux décrire ce que vous que vous ressentez **à l'instant présent**. Il n'y a ni bonne, ni mauvaise réponse.

	Pas d'accord	Je ne sais pas	Assez d'accord	Extrêmement d'accord
1. Actif				
2. Indifférent				
3. Endormi				
4. Mal à l'aise				
5. Energique				
6. Calme				
7. Fatigué				
8. Dynamique				
9. Détendu				
10. Attentif				
11. Somnolent				
12. Inquiet				
13. Tonique avec « la pêche »				
14. Tranquille				
15. Eveillé				
16. Enervé				
17. Paisible				
18. En forme				
19. Tendus				
20. Crispé				



## 6.5. Modes psychophysiologicals (McCraty et al. 2009)

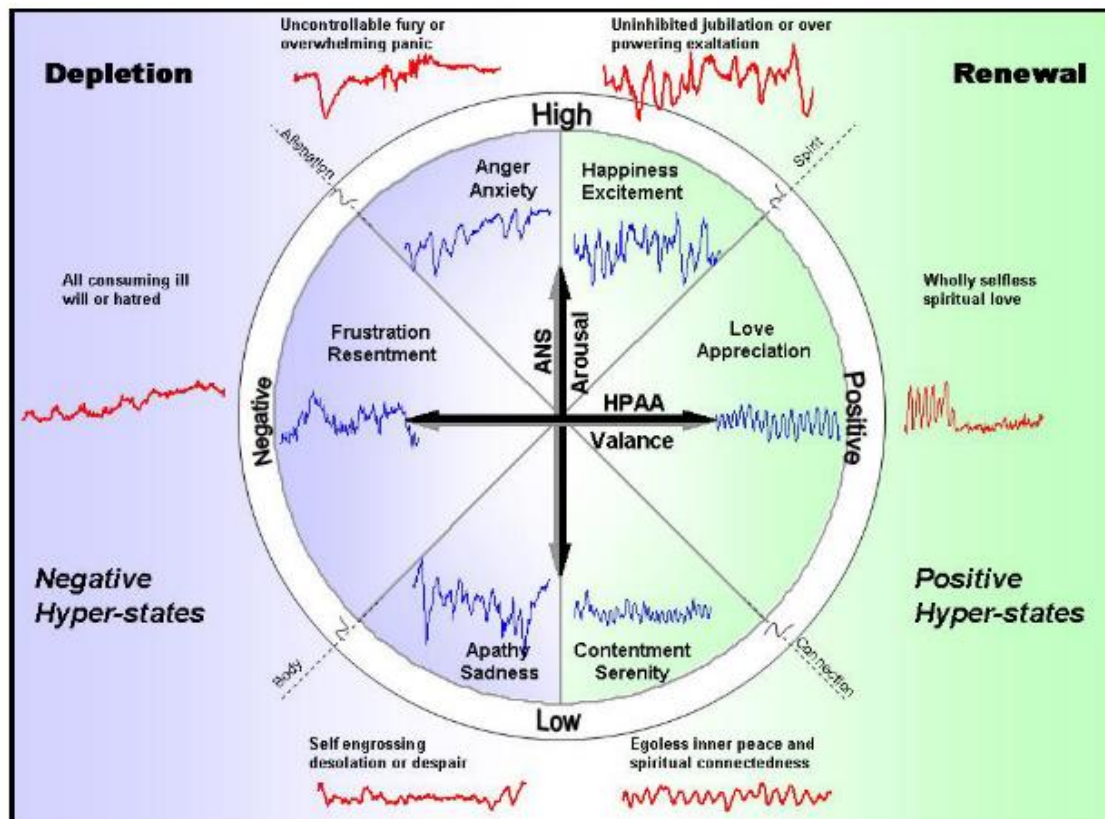


Figure 3. Two qualitatively different categories of psychophysiological interaction are depicted—the area within the inner circle represents the range of emotional experience of “normal,” everyday life; the area beyond the outer circle represents psychophysiological hyper-states of extreme emotional experience. The psychophysiological transition from one region to another involves an abrupt phase transition, which is depicted graphically by the white space between the two circles. Two dimensions differentiate the varieties of emotional experience shown; for simplification, the relevant psychological and physiological variables are superimposed on the axis for each dimension. One dimension is the degree of emotional arousal (vertical axis, high to low)—known to be covariant with ANS balance. The second dimension is the valence of the emotion (horizontal axis, positive or negative)—assumed covariant with the degree of activation of the hypothalamic-pituitary- adrenal (HPA) axis. Different patterns of HRV are predicted from the particular combination of arousal and valence values on the two dimensions. Within the inner circle are six segments, each of which demarcates a range of emotion experienced in everyday life. Typical HRV patterns associated with each emotion are shown. The area beyond the outer circle depicts six hyper- states, in which intense emotional experience drives the activity of physiological systems past normal function into extreme modes. The known and predicted HRV waveform patterns associated with these hyper-states are also shown. The labels “Depletion” and “Renewal,” on the left and right-hand side of the diagram, respectively, highlight the relationship between the valence of feelings and emotions experienced and the psychophysiological consequences for the individual. Negative emotional states can lead to emotional exhaustion and depletion of physiological reserves. By contrast, positive emotional states are associated with increased psychophysiological efficiency and regeneration

## 6.6. Définition de l'humeur, des émotions et des affects (Gilet, 2008)

Le terme affect est souvent utilisé comme terme générique pour désigner humeurs et émotions. Les émotions et l'humeur sont deux états affectifs qui entretiennent des relations particulières. Les **émotions** drainent souvent un état d'humeur latent qui perdure au-delà même de l'effet des émotions, elles impliquent une **relation sujet-objet**. En effet, les émotions sont généralement déclenchées en réponse à un objet ou une situation spécifique facilement identifiable et ce, de façon brève et intense interrompant l'individu dans ses activités cognitives. Elles impliquent la prise en compte d'informations, élaborées et conscientes, relatives aux antécédents et aux conséquences des actions. Les **humeurs**, en revanche, sont beaucoup moins spécifiques et plus générales. Ce sont des états affectifs **moins intenses mais durables et envahissants**, toujours présents en arrière-plan, moins accessibles à la conscience. Par ailleurs, les humeurs n'entraînent pas de rupture dans les comportements des sujets, principalement à cause de leur plus faible intensité. » (Gilet, 2008).

## 6.7. Modèle d'interaction entre variabilité de la fréquence cardiaque et régulation émotionnelle (Mather et Thayer, 2018)

### *How heart rate variability affects emotion regulation brain networks*

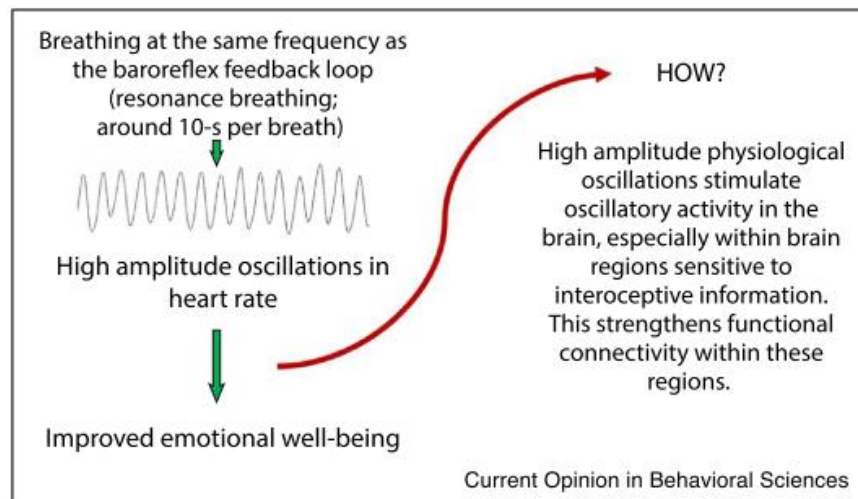


Figure 4 . Article summary figure. How resonance breathing could lead to improved emotional well-being by stimulating functional connectivity of emotion regulation networks within the brain

## 6.8. Questionnaire peur de l'évaluation négative : PEN (Musa et al. 2004)

Répondre par VRAI (V) ou FAUX (F) à chacune des questions suivantes : **entourer les lettres V ou F**

- 1) Je m'inquiète rarement de paraître ridicule. **V ou F**
- 2) Je m'inquiète de l'opinion des autres même quand je sais que cela n'a aucune importance. **V ou F**
- 3) Je deviens tendu(e) et agité(e) si je sais qu'on est en train de me juger. **V ou F**
- 4) Je suis imperturbable même si je sais qu'on est en train de se faire une opinion défavorable sur moi. **V ou F**
- 5) Je suis bouleversé(e) quand je commets une erreur en société. **V ou F**
- 6) Les opinions que les gens importants ont de moi ne me soucient guère. **V ou F**
- 7) J'ai souvent peur de paraître ridicule ou de me comporter d'une façon absurde. **V ou F**
- 8) Je réagis très peu quand les gens me désapprouvent. **V ou F**
- 9) J'ai souvent peur que les gens s'aperçoivent de mes défauts. **V ou F**
- 10) La désapprobation des autres a peu d'effet sur moi. **V ou F**
- 11) Si quelqu'un est en train de m'évaluer, je m'attends au pire. **V ou F**
- 12) Je m'inquiète rarement de l'impression que je donne aux autres. **V ou F**
- 13) J'ai peur d'être désapprouvé(e). **V ou F**
- 14) J'ai peur que les autres me trouvent des défauts. **V ou F**
- 15) Ce que les autres pensent de moi m'est égal. **V ou F**
- 16) Je ne suis pas peiné(e) si je ne plais pas à quelqu'un. **V ou F**
- 17) Lorsque je suis en train de parler à quelqu'un je m'inquiète de ce qu'il est en train de penser de moi. **V ou F**
- 18) Je pense que parfois on ne peut pas éviter de faire des erreurs en société, alors je ne m'inquiète pas. **V ou F**
- 19) Je m'inquiète de l'impression que je donne aux autres. **V ou F**
- 20) Je m'inquiète beaucoup de l'impression que je donne à mes supérieurs. **V ou F**
- 21) Si je sais que quelqu'un est en train de me juger, cela ne me perturbe pas. **V ou F**
- 22) Je m'inquiète en imaginant que les autres pensent que je ne vauds rien. **V ou F**
- 23) Je m'inquiète très peu de ce que les autres vont penser de moi. **V ou F**
- 24) Parfois, je pense que je m'inquiète trop de ce que les autres vont penser de moi. **V ou F**
- 25) Je m'inquiète souvent en m'imaginant que je vais faire ou dire ce qu'il ne faut pas. **V ou F**
- 26) Je suis souvent indifférent(e) à ce que les autres pensent de moi. **V ou F**
- 27) En général, je suis confiant(e) de l'impression favorable que je donne aux autres. **V ou F**
- 28) Je m'inquiète souvent en m'imaginant que les gens que je considère importants, ne pensent pas grand chose de moi. **V ou F**
- 29) Je me pose souvent des questions sur les opinions de mes amis à mon sujet. **V ou F**
- 30) Je deviens tendu(e) et agité(e) si je sais que je suis en train d'être jugé(e) par mes supérieurs. **V ou F**

## 6.9. Questionnaire Personnalité : Big-Five (Plaisant et al. 2010)

Vous allez trouver un certain nombre de qualificatifs qui peuvent ou non s'appliquer à vous en général. Veuillez écrire devant chaque affirmation le chiffre indiquant combien vous approuvez ou désapprouvez l'affirmation (en fonction du degré auquel celle-ci vous correspond).

1	2	3	4	5
<i>Désapprouve fortement</i>	<i>Désapprouve un peu</i>	<i>N'approuve ni ne désapprouve</i>	<i>Approuve un peu</i>	<i>Approuve fortement</i>

« Je me vois comme quelqu'un qui ... »

1. \_\_\_ est bavard
2. \_\_\_ a tendance à critiquer les autres
3. \_\_\_ travaille consciencieusement
4. \_\_\_ est déprimé, cafardeux
5. \_\_\_ est créatif, plein d'idées originales
6. \_\_\_ est réservé
7. \_\_\_ est serviable et n'est pas égoïste avec les autres
8. \_\_\_ peut être parfois négligent
9. \_\_\_ est "relaxé", détendu, gère bien les stress
10. \_\_\_ s'intéresse à de nombreux sujets
11. \_\_\_ est plein d'énergie
12. \_\_\_ commence facilement à se disputer avec les autres
13. \_\_\_ est fiable dans son travail
14. \_\_\_ peut être angoissé
15. \_\_\_ est ingénieux, une grosse tête
16. \_\_\_ communique beaucoup d'enthousiasme
17. \_\_\_ est indulgent de nature
18. \_\_\_ a tendance à être désorganisé
19. \_\_\_ se tourmente beaucoup
20. \_\_\_ a une grande imagination
21. \_\_\_ a tendance à être silencieux
22. \_\_\_ fait généralement confiance aux autres
23. \_\_\_ a tendance à être paresseux
24. \_\_\_ est quelqu'un de tempéré, pas facilement troublé
25. \_\_\_ est inventif
26. \_\_\_ a une forte personnalité, s'exprime avec assurance
27. \_\_\_ est parfois dédaigneux, méprisant
28. \_\_\_ persévère jusqu'à ce que sa tâche soit finie
29. \_\_\_ peut être lunatique d'humeur changeante
30. \_\_\_ apprécie les activités artistiques et esthétiques
31. \_\_\_ est quelquefois timide, inhibé
32. \_\_\_ est prévenant et gentil avec presque tout le monde
33. \_\_\_ est efficace dans son travail
34. \_\_\_ reste calme dans les situations angoissantes
35. \_\_\_ préfère un travail simple et routinier
36. \_\_\_ est sociable, extraverti
37. \_\_\_ est parfois impoli avec les autres
38. \_\_\_ fait des projets et les poursuit
39. \_\_\_ est facilement anxieux
40. \_\_\_ aime réfléchir et jouer avec des idées
41. \_\_\_ est peu intéressé par tout ce qui est artistique
42. \_\_\_ aime coopérer avec les autres
43. \_\_\_ est facilement distrait
44. \_\_\_ a de bonnes connaissances en art, musique ou en littérature
45. \_\_\_ cherche des histoires aux autres

## 6.10. Grille d'évaluation technique en simulation haute-fidélité (e.g. choc septique)

Action	Réalisation spontanée	Facilitation implicite	Facilitation explicite/non réalisée
Recherches de marbrures	2	1	0
Recherche TRC allongé	2	1	0
Auscultation cardio-respiratoire	2	1	0
Auscultation abdominale	2	1	0
Palpation abdominale	2	1	0
Palpation lombaire	4	2	0
BU	2	1	0
Vérification/pose VVP	2	1	0
Noradrénaline IVSE	4	2	0
d'emblée	2	1	0
2nde VVP dédiée	2	1	0
Pose de KTA	2	1	0
Remplissage vasculaire	4	2	0
cristalloïde	2	1	0
≥ 3 x 500 mL	2	1	0
Oxygénothérapie	4	2	0
au MHC	2	1	0
Dosage du lactate	2	2	0
Hémocultures	4	2	0
avant ATB	2	1	0
ECBU	2	1	0
avant ATB	2	1	0
Recherche FdR BLSE communautaire	4	2	0
Antibiotiques	2	1	0
carbapénèmes	4	2	0
aminosides	2	1	0
aminosides bonne poso	2	1	0
Discussion TDM en urgence	2	1	0
Réalisation échographies en urgence			
FAST Echo	2	1	0
Echocardiographie	2	1	0
Echographie rénale	4	2	0
Diagnostic de PNA obstructive	4	2	0
Allo chir uro	6	3	0
demande de JJ en urgence	4	2	0
Allo anesth	4	2	0
Allo réa	4	2	0
Prononciation "choc"	2	0	0
Prononciation "septique"	2	0	0
Prononciation "PNA"	2	1	0
Prononciation "obstructive"	4	2	0
Prononciation "dérivation urinaire"	2	1	0

## 6.11. Evaluation non-technique en simulation haute-fidélité : Ottawa (Kim et al. 2006)

### APPENDIX A – OTTAWA CRISIS RESOURCE MANAGEMENT (CRM) GLOBAL RATING SCALE (“Ottawa GRS”)

#### EVALUATION CRITERIA:

This evaluation scale is directed towards assessing competence in crisis management (CM) skills and care of critically ill patients. The standard of competence has been set at the senior resident level, i.e. the third-year resident who has had prior ICU experience, and through experience as a senior housestaff physician, has previous experience in managing crises. As there exists a requisite base of medical knowledge required to effectively manage crises, this will also be evaluated. However, the focus of evaluation will be on crisis management skills. The skills listed below comprise essential aspects of crisis management. In the simulator case scenario sessions, performance in each of these areas will be assessed, in addition to the amount of prompting or guidance required during the case scenario sessions.

The following criteria will be evaluated:

#### LEADERSHIP SKILLS

Stays calm and in control during crisis  
Prompt and firm decision-making  
Maintains global perspective (“Big picture”)

#### PROBLEM SOLVING

Organized and efficient problem solving approach (ABC’s)  
Quick in implementation (Concurrent management)  
Considers alternatives during crisis

#### SITUATIONAL AWARENESS

Avoids fixation error  
Reassesses and re-evaluates situation constantly  
Anticipates likely events

#### RESOURCE UTILIZATION

Calls for help appropriately  
Utilizes resources at hand appropriately  
Prioritizes tasks appropriately

#### COMMUNICATION SKILLS

Communicates clearly and concisely  
Uses directed verbal/non-verbal communication  
Listens to team input

#### OVERALL

Resident #: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

Staff: \_\_\_\_\_

Time: \_\_\_\_\_

#### OVERALL PERFORMANCE

1	2	3	4	5	6	7
Novice; all CM skills require significant improvement		Advanced novice; many CM skills require moderate improvement		Competent; most CM skills require minor improvement		Clearly superior; few, if any CM skills that only require minor improvement

#### I. LEADERSHIP SKILLS

1	2	3	4	5	6	7
Loses calm and control for most of crisis; unable to make firm decisions; cannot maintain global perspective		Loses calm/control frequently during crisis; delays in making firm decisions (or with cueing); rarely maintains global perspective		Stays calm and in control for most of crisis; makes firm decisions with little delay; usually maintains global perspective		Remains calm and in control for entire crisis; makes prompt and firm decisions without delay; always maintains global perspective

#### II. PROBLEM SOLVING SKILLS

1	2	3	4	5	6	7
Cannot implement ABC’s assessment without direct cues; uses sequential management despite cues; fails to consider any alternative in crisis		Incomplete or slow ABC assessment; mostly uses sequential management approach unless cued; gives little consideration to alternatives		Satisfactory ABC assessment; without cues; mostly uses concurrent management approach with only minimal cueing; considers some alternatives in crisis		Thorough yet quick ABC without cues; always uses concurrent management approach; considers most likely alternatives in crisis

#### III. SITUATIONAL AWARENESS SKILLS

1	2	3	4	5	6	7
Becomes fixated easily despite repeated cues; fails to re-assess and re-evaluate situation despite repeated cues; fails to anticipate likely events		Avoids fixation error only with cueing; rarely reassesses and re-evaluates situation without cues; rarely anticipates likely events		Usually avoids fixation error with minimal cueing; reassesses re-evaluates situation frequently with minimal cues; usually anticipates likely events		Avoids any fixation error without cues; constantly reassesses and re-evaluates situation without cues; constantly anticipates likely events

#### IV. RESOURCE UTILIZATION SKILLS

1	2	3	4	5	6	7
Unable to use resources & staff effectively; does not prioritize tasks or ask for help when required despite cues		Able to use resources with minimal effectiveness; only prioritizes tasks or asks for help when required with cues		Able to use resources with moderate effectiveness; able to prioritize tasks and/or ask for help with minimal cues		Clearly able to utilize resources to maximal effectiveness; sets clear task priority and asks for help early with no cues

#### V. COMMUNICATION SKILLS

1	2	3	4	5	6	7
Does not communicate with staff; does not acknowledge staff communication, never uses directed verbal/non-verbal communication		Communicates occasionally with staff, but unclear and vague; occasionally listens to but rarely interacts with staff; rarely uses directed verbal/non-verbal communication		Communicates with staff clearly and concisely most of time; listens to staff feedback; usually uses directed verbal/non-verbal communication		Communicates clearly and concisely at all times, encourages input and listens to staff feedback; consistently uses directed verbal/non-verbal communication

## 6.12. Questionnaire : Movement Imagery Questionnaire – Révisée : MIQ-R (Williams et al. 2012)

Le présent questionnaire étudie 2 façons de se **représenter mentalement** un mouvement. Ces techniques sont utilisées plus fréquemment par certaines personnes que par d'autres, ou sont plus applicables à certains mouvements que d'autres. La première consiste à visualiser le mouvement (se voir en train de l'effectuer). La seconde consiste à percevoir, ou ressentir, ce que produit l'exécution d'un mouvement, sans pour autant l'accomplir dans la réalité. Ce questionnaire demande d'effectuer ces deux types de représentations mentales, pour différents mouvements simples, et d'évaluer la difficulté ou la facilité avec laquelle vous l'avez visualisé ou ressenti. Les scores que vous indiquerez ne serviront pas à évaluer la justesse de votre représentation mentale, mais davantage à évaluer vos capacités à imaginer plus ou moins facilement le mouvement. Il n'y a pas de « bons » ni de « mauvais » scores. Chacun des énoncés suivants décrit un mouvement simple. Lisez bien chaque énoncé et **effectuez le mouvement tel qu'il est décrit. Ne l'effectuez qu'une seule fois**. Reprenez à la position initiale du mouvement, comme si vous alliez le refaire. Ensuite, en fonction des consignes, 1) **visualisez** aussi clairement que possible le mouvement que vous venez de faire (essayez de vous voir en train de l'effectuer), ou 2) essayez **d'imaginer, de percevoir les sensations produites par le mouvement**, sans pour autant le faire réellement. Une fois le mouvement imaginé, inscrivez le score correspondant à la difficulté ou facilité avec laquelle vous avez effectué la tâche mentale demandée. L'échelle à utiliser se trouve à la fin du document. Soyez aussi précis que possible et prenez le temps qu'il faudra pour donner une réponse précise. Il se peut que vous ayez le même score pour plusieurs mouvements « imaginés » ou « ressentis », et il est aussi possible que vous n'utilisiez pas toute l'échelle. Lisez bien tout le mouvement avant de le faire.

Tenez-vous debout, bien droit, les pieds et les jambes ensemble, les bras le long du corps.

Levez le genou droit aussi haut que possible de sorte que vous soyez en équilibre sur la jambe gauche, la jambe droite pliée au niveau du genou. Redescendez la jambe droite pour revenir en position initiale, sur les deux pieds. Effectuez ce mouvement LENTEMENT.

Prenez la position de départ. Essayez de ressentir intérieurement le mouvement que vous venez de faire, sans en faire les gestes. Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette activité.

Tenez-vous debout, bien droit, les jambes légèrement écartées, les bras le long du corps.

Accroupissez-vous et sautez ensuite aussi haut que possible, les deux bras levés au-dessus de la tête. Retombez sur vos pieds, légèrement écartés, et replacez les bras le long du corps.

Prenez la position de départ. Visualisez aussi clairement que possible le mouvement que vous venez de faire (sans l'effectuer). Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette activité.

Étendez le bras de votre main non dominante sur le côté, parallèle au sol, paume vers le plancher.

Ramenez le bras jusqu'à ce qu'il soit en face de vous, toujours parallèle au sol. Gardez le bras bien tendu durant le mouvement. Effectuez-le lentement.

Prenez la position de départ. Essayez de ressentir intérieurement le mouvement que vous venez de faire, sans en faire les gestes. Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette activité.

Tenez-vous debout, bien droit, les jambes légèrement écartées, les bras tendus au-dessus de la tête.

Penchez légèrement le haut du corps et tentez de toucher les orteils avec le bout des doigts (ou si c'est possible, touchez le plancher avec vos doigts ou avec les paumes de main). Reprenez ensuite la position initiale, les mains étendues au-dessus de la tête.

Prenez la position de départ. Visualisez aussi clairement que possible le mouvement que vous venez de faire (sans l'effectuer). Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette activité.

Tenez-vous debout, bien droit, les jambes légèrement écartées, les bras le long du corps.

Accroupissez-vous et sautez ensuite aussi haut que possible, les deux bras étendus au-dessus de la tête. Retombez sur vos pieds légèrement écartés et replacez les bras le long du corps.

Prenez la position de départ. Essayez de ressentir intérieurement le mouvement que vous venez de faire, sans en faire les gestes. Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette tâche.

Tenez-vous debout, bien droit, les pieds et les jambes ensemble, les bras le long du corps.

Levez le genou droit aussi haut que possible de sorte que vous soyez en équilibre sur la jambe gauche, la jambe droite pliée au niveau du genou. Redescendez la jambe droite pour revenir en position initiale, sur les deux pieds. Faites ce mouvement lentement.

Prenez la position de départ. Visualisez aussi clairement que possible le mouvement que vous venez de faire (sans l'effectuer). Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette activité.

Tenez-vous debout, bien droit, les jambes légèrement écartées, les bras tendus au-dessus de la tête.

Penchez légèrement le haut du corps et tentez de toucher les orteils avec le bout des doigts (ou si possible, touchez le plancher avec vos doigts ou avec les paumes de main). Reprenez la position initiale, avec les mains étendues au-dessus de la tête.

Prenez la position de départ. Essayez de ressentir intérieurement le mouvement que vous venez de faire, sans en faire les gestes. Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette tâche.

Étendez le bras de votre main non dominante sur le côté, parallèle au sol, paume vers le plancher.

Ramenez le bras jusqu'à ce qu'il soit en face de vous, toujours parallèle au sol. Gardez le bras bien tendu durant le mouvement. Effectuez-le lentement.

Prenez la position de départ. Visualisez aussi clairement que possible le mouvement que vous venez de faire (sans l'effectuer). Inscrivez maintenant le degré de difficulté/facilité que vous a demandé cette tâche.

## 6.13. Tableaux de résultats, étude 4

**Table:** TIME effects on stress markers. Values expressed are estimated differences  $\pm$  standard error for time comparisons. Significant and trend ( $p < 0.10$ ) differences are in bold. There were a main TIME effects in : VAS stress ( $\chi^2(4) = 129.74$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.22$ ), relaxation level ( $\chi^2(1) = 87.61$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.18$ ), activation level ( $\chi^2(1) = 24.41$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.11$ ), heart rate ( $\chi^2(4) = 580.12$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.01$ ), RMSSD ( $\chi^2(3) = 172.47$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.25$ ), SDRR ( $\chi^2(3) = 137.62$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.24$ ), pNN50 ( $\chi^2(3) = 201.64$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.28$ ), LF/HF ratio ( $\chi^2(3) = 223.60$ ,  $p < 0.001$ ,  $Rp2 = 0.47$ ) and cortisol ( $\chi^2(3) = 15.08$ ,  $p = 0.002$ ,  $Rp2 = 0.05$ ). Data expectedly confirmed that an overall stress response occurred during both the anticipation and the stressor occurrence.

	TIME	estimate	SE	p value
<b>VAS stress</b>	BASAL VS TSAS	- 1.50	0.23	<b>&lt;0.001</b>
	TSAS VS INTERVENTION	1.10	0.23	<b>&lt;0.001</b>
	INTERVENTION VS STRESS	- 1.59	0.23	<b>&lt;0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	1.99	0.23	<b>&lt;0.001</b>
<b>AD-ACL relaxation</b>	PRE-INTERVENTION VS POST-INTERVENTION	- 0.63	0.07	<b>&lt;0.001</b>
<b>AD-ACL activation</b>	PRE-INTERVENTION VS POST-INTERVENTION	0.46	0.09	<b>&lt;0.001</b>
<b>Heart rate</b>	BASAL VS TSAS	- 5.12	0.83	<b>&lt;0.001</b>
	TSAS VS INTERVENTION	5.55	0.83	<b>&lt;0.001</b>
	INTERVENTION VS STRESS	- 15.32	0.83	<b>&lt;0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	17.81	0.83	<b>&lt;0.001</b>
<b>RMSSD</b>	BASAL VS INTERVENTION	- 4.87	1.59	<b>&lt;0.01</b>
	INTERVENTION VS STRESS	18.06	1.59	<b>&lt;0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	- 17.85	1.59	<b>&lt;0.001</b>
<b>SDRR</b>	BASAL VS INTERVENTION	- 24.83	2.83	<b>&lt;0.001</b>
	INTERVENTION VS STRESS	28.99	2.83	<b>&lt;0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	- 19.26	2.83	<b>&lt;0.001</b>
<b>pNN50</b>	BASAL VS INTERVENTION	- 4.37	1.37	<b>0.003</b>
	INTERVENTION VS STRESS	16.59	1.37	<b>0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	- 16.87	1.37	<b>0.001</b>
<b>LF/HF</b>	BASAL VS INTERVENTION	- 0.473	0.04	<b>0.001</b>
	INTERVENTION VS STRESS	- 0.229	0.04	<b>0.001</b>
	STRESS VS COGNITION	- 0.227	0.04	<b>0.001</b>
<b>Cortisol</b>	BASAL VS INTERVENTION	- 0.339	0.872	1.000
	INTERVENTION VS STRESS	- 2.647	0.872	0.014
	STRESS VS COGNITION	3.014	0.867	<b>0.004</b>



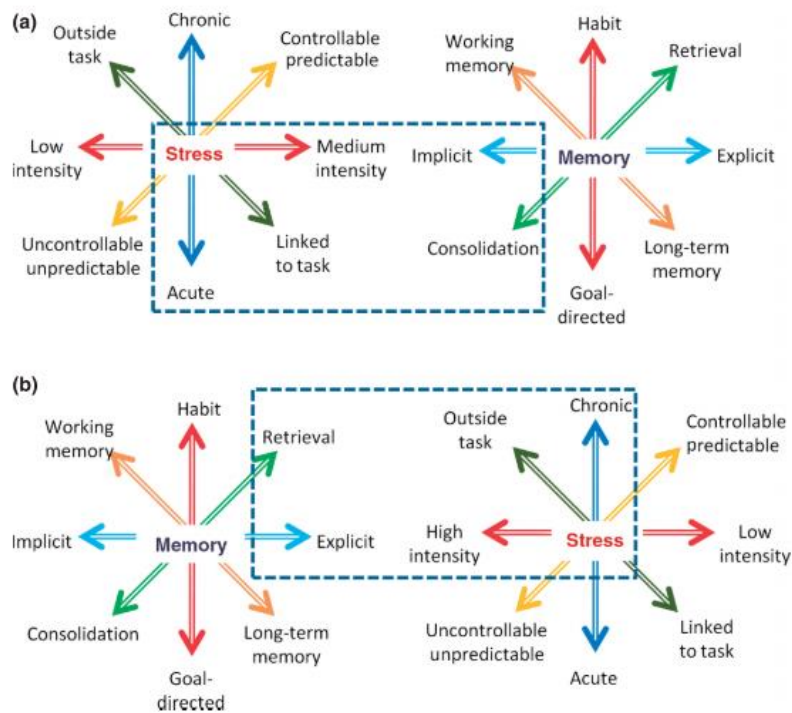
Table: GROUP effects on stress markers and subjective performances. Values expressed are estimated differences  $\pm$  standard error for GROUP comparisons. Significant and trend ( $p < 0.10$ ) differences are in bold. There were no main GROUP effects on VAS stress ( $\chi^2(3) = 5.02$ ,  $p = 0.17$ ), relaxation level ( $\chi^2(3) = 5.02$ ,  $p = 0.17$ ), activation level ( $\chi^2(3) = 1.41$ ,  $p = 0.70$ ), heart rate ( $\chi^2(3) = 0.33$ ,  $p = 0.95$ ), RMSSD ( $\chi^2(3) = 1.47$ ,  $p = 0.69$ ), pNN50 ( $\chi^2(3) = 1.19$ ,  $p = 0.75$ ), and cortisol ( $\chi^2(3) = 1.79$ ,  $p < 0.623$ ). There was a main group effect for SDRR ( $\chi^2(3) = 8.19$ ,  $p = 0.042$ ,  $R_p2 = 0.12$ ) and LF/HF ratio ( $\chi^2(3) = 37.56$ ,  $p < 0.001$ ,  $R_p2 = 0.36$ ).

	GROUP	estimate	SE	p value	Cohen's d
SDRR	CTRL VS BFB	- 4.83	7.67	0.795	0.17
	CTRL VS TDCS	8.83	7.86	0.795	0.35
	CTRL VS BFB + TDCS	- 12.77	7.86	0.435	0.41
	BFB VS TDCS	13.66	7.55	0.373	0.47
	BFB VS BFB + TDCS	- 7.93	7.55	0.795	0.23
	TDCS VS BFB + TDCS	- 21.60	7.75	<b>0.041</b>	<b>0.69</b>
LF/HF	CTRL VS BFB	- 0.27	0.07	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.74</b>
	CTRL VS TDCS	- 0.02	0.07	0.720	0.10
	CTRL VS BFB + TDCS	- 0.33	0.07	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.79</b>
	BFB VS TDCS	0.25	0.07	<b>0.001</b>	<b>0.66</b>
	BFB VS BFB + TDCS	- 0.06	0.07	0.720	0.12
	TDCS VS BFB + TDCS	- 0.31	0.07	<b>0.001</b>	<b>0.73</b>

	GROUP	Difference	Lower CI	Upper CI	p value	Cohen's d
VAS diminution	CTRL VS BFB	-1.70	0.04	-3.44	0.055	0.55
	CTRL VS TDCS	-0.58	1.16	-2.32	0.509	0.18
	CTRL VS BFB + TDCS	-3.54	-1.80	-5.28	<b>&lt;0.001</b>	<b>1.29</b>
	BFB VS TDCS	1.12	2.86	-0.62	0.204	0.40
	BFB VS BFB + TDCS	-1.84	-0.11	-3.58	<b>0.038</b>	<b>0.81</b>
	TDCS VS BFB + TDCS	-2.96	-1.23	-4.07	<b>0.001</b>	<b>1.24</b>
VAS performance	CTRL VS BFB	-2.19	-0.73	-3.66	<b>0.004</b>	<b>0.94</b>
	CTRL VS TDCS	-0.21	1.26	-1.68	0.776	0.08
	CTRL VS BFB + TDCS	-2.85	-1.38	-4.32	<b>&lt;0.001</b>	<b>1.27</b>
	BFB VS TDCS	1.99	3.45	0.52	<b>0.009</b>	<b>0.82</b>
	BFB VS BFB + TDCS	-0.66	0.81	-2.12	0.377	0.30
	TDCS VS BFB + TDCS	-2.64	-1.17	-4.10	<b>&lt;0.001</b>	<b>1.13</b>

	TIME	estimate	SE	p value
Error score	SESSION 1 VS SESSION 2	1.16	0.198	<b>&lt;0.001</b>
Response time score	SESSION 1 VS SESSION 2	74.4	8.19	<b>&lt;0.001</b>

## 6.14. Métaphore de la roulette (Sandi, 2013)



**FIGURE 2** | Scheme showing the roulette metaphor for different combinatorial possibilities occurring in the intersection between specific stress conditions and cognitive processing and defined by the elements inserted in each box. (a) Elements in the insert include a constellation of factors exemplifying conditions in which an acute, medium intensity stressor is acutely triggered by an implicit memory task and elevated during the consolidation period—according to the literature, this constellation will typically lead to improved memory as compared to lower stress conditions. (b) The constellations of elements here include a chronic stress situation of high intensity experienced before individuals are exposed to the retrieval of an explicit memory task—according to the literature, the expected results in this case will be impaired retrieval as compared to a nonstress condition.

## Résumé

Le stress est une cause majeure d'invalidité due à ses effets néfastes sur les fonctions exécutives et ses complications sur la santé. Dans le cadre de cette thèse nous avons cherché à mieux caractériser quand, comment, et pourquoi le stress apparaissait. Notre approche pluridisciplinaire s'ancre dans la continuité des récents travaux questionnant les outils de remédiation et les sensibilités individuelles. Le 1<sup>er</sup> objectif était de déterminer l'impact d'un stress aigu sur les capacités d'imagerie motrice. Nos résultats montrent que lorsque l'imagerie est réalisée consciemment, elle est perméable au stress. Le 2<sup>nd</sup> objectif était de caractériser la période d'anticipation d'un évènement stressant pour cela nous avons élaboré un protocole d'induction de stress d'anticipation. Le 3<sup>ème</sup> objectif était d'explorer de nouvelles approches non-invasives de remédiation. Nous avons comparé l'efficacité de 4 techniques administrées pendant un stress d'anticipation (5 ou 15 min) : respiration relaxante, rétrocontrôle biologique cardiaque (VFC-RETRO), stimulation cérébrale du cortex préfrontal dorsolatéral (STCC), VFC-RETRO couplé à la STCC. Ces techniques ont été explorées au laboratoire et durant un stress professionnel médical (simulation de soins critiques). Nos résultats indiquent que ces méthodes de remédiation ont des effets psychophysiologiques et comportementaux spécifiques. Hormis la STCC, elles sont toutes efficaces pour réduire le stress (VFC-RETRO + STCC > VFC-RETRO > RESPIRATION). Nos résultats démontrent pour la première fois l'intérêt des interventions préventives de très courte durée, pour prévenir les réponses psychophysiologiques et les détériorations cognitives habituellement observées lors d'un stress aigu. Le 4<sup>ème</sup> objectif était d'évaluer l'influence des traits de personnalité sur la sensibilité au stress et l'efficacité des techniques de remédiation. Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives dans le traitement préventif et individualisé des maladies associées au stress.

**Mots clés :** Anticipation, Coping, Imagerie Motrice, Personnalité, Rétrocontrôle, Simulation, STCC, Stress

## Summary

Stress is a major cause of disability due to its detrimental effects on executive functions and its complications on psychological and physical health. In this thesis, we aimed to better characterize when, how, and why stress occurs. Our multidisciplinary approach is in line with recent works seeking to explore the impacts of coping tools and individual sensibility. The 1<sup>st</sup> aim was to determine the impact of acute stress on motor imagery abilities, and we showed that explicit motor imagery is not impaired by stress. The 2<sup>nd</sup> aim was to characterize the period of stress anticipation, and to do so we developed the Trier Social Anticipatory Stress test. The 3<sup>rd</sup> goal was to explore non-invasive therapeutic coping approaches. We compared the effectiveness of 4 techniques: relaxing breathing, cardiac biofeedback (VFC-RETRO), brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex (tDCS), VFC-RETRO paired with tDCS. We administered these techniques during anticipatory stress periods in the laboratory (15 min) or in a professional stress (critical care simulation) (5 min). Our results shed light on the specificities of these interventions on psychophysiological markers and performance. Except tDCS, all interventions were effective in reducing stress (VFC-RETRO + tDCS > VFC-RETRO > BREATHING). Our results demonstrated for the first time the effectiveness of applying very short interventions to prevent the psychophysiological responses and cognitive deteriorations usually observed after stressful events. The last aim was to assess the impact of personality on stress sensitivity and effectiveness of coping techniques. Together, our work offers fruitful perspectives in the preventive and individualized treatment of stress-related diseases.

**Key words:** Anticipation, Biofeedback, Coping, Motor Imagery, Personality, Simulation, Stress, tDCS