PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Comprendre l'impact de l'impuissance apprise : une perspective individuelle et organisationnelle grâce à l'usage de l'IRM fonctionnelle
Auteur: Author:	Pierre Lechat
Date:	2024
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Lechat, P. (2024). Comprendre l'impact de l'impuissance apprise : une perspective individuelle et organisationnelle grâce à l'usage de l'IRM fonctionnelle [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/57726/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/57726/
Directeurs de recherche: Advisors:	Samuel Bassetto, & Eva Alonso Ortiz
Programme: Program:	Maîtrise recherche en génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Comprendre l'impact de l'impuissance apprise : une perspective individuelle et organisationnelle grâce à l'usage de l'IRM fonctionnelle

PIERRE LECHAT

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Mars 2024

© Pierre Lechat, 2024.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Comprendre l'impact de l'impuissance apprise : une perspective individuelle et organisationnelle grâce à l'usage de l'IRM fonctionnelle

présenté par : **Pierre LECHAT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Firdaous SEKKAY, présidente

Samuel Jean BASSETTO, membre et directeur de recherche

Eva ALONSO ORTIZ, membre et codirectrice de recherche

Emily B. J. COFFEY, membre

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers le directeur de recherche, Samuel Bassetto, dont le dévouement, la compréhension et la motivation ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire. Sa guidance éclairée a été une source d'inspiration tout au long de ce projet.

Un immense merci à ma co-directrice, Eva Alonso Ortiz, pour sa patience, son dévouement et son assistance précieuse dans l'élaboration de la méthodologie scientifique. Sa contribution a été essentielle à la qualité de cette recherche.

Je tiens à remercier chaleureusement André Cyr, technicien à l'UNF, dont l'aide a été inestimable dans la mise en place du protocole. Sa patience lors des séances a facilité grandement le déroulement de l'étude.

Mes remerciements vont également à Jan Valosek, membre du laboratoire de Neuropoly, dont l'assistance lors de ma maîtrise pour la méthodologie et l'analyse des données a été d'une aide précieuse.

Un sincère remerciement au comité d'éthique pour ses conseils précieux tout au long de la recherche, contribuant ainsi à la rigueur et à l'éthique de cette étude.

Une reconnaissance particulière aux participants qui ont courageusement participé à l'aventure de l'impuissance apprise, certains n'ayant jamais réalisé de séance en IRMf. Leur engagement a été fondamental pour la réalisation de cette recherche.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Julie Boyle, professeur à l'UDEM, qui a soutenu le projet et m'a mis en contact avec certains de ses étudiants. Un merci spécial à Marie-Ève Picard, étudiante à l'UDEM, pour son précieux soutien dans l'analyse des données électrodermales.

Un grand merci à Arnaud Boré, qui a apporté son expertise dans la gestion des données sur les serveurs de l'unité de neuroscience fonctionnelle (UNF), contribuant ainsi à la robustesse de l'ensemble du processus de recherche.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements, leur bonne humeur et leur enthousiasme tout au long de ce parcours. Leur présence a été un pilier essentiel, et je leur suis profondément reconnaissant.

RÉSUMÉ

En entreprise, les employés sont sujets à des processus de prise de décisions et de résolution de problèmes dans chaque étape des missions qu'ils sont amenés à faire. Ces phénomènes cognitifs résultent de processus internes complexes suscitant des émotions et faisant intervenir de multiples zones du cerveau. Ces processus peuvent être affectés par de multiples biais et expériences passées qui vont venir affecter la prise de décision et l'efficacité à la résolution de problèmes futurs. Un des phénomènes ayant un impact sur ce circuit de la décision est l'impuissance apprise (IA) qui apparaît lorsqu'un individu vit une expérience où il est inexorablement mis en échec. Ainsi l'individu anticipe constamment l'échec et se crée la croyance de son impuissance. Cette impossibilité de s'en sortir affecte négativement le circuit de la prise de décision ainsi que la capacité à résoudre adéquatement les problèmes. Ces aptitudes étant employées dans des domaines autres que celui de la situation impossible, les altérations peuvent présenter des conséquences dans une panoplie variée de situation de la vie courante. Il est alors à noter que ce phénomène d'IA, induit des comportements qui présentent des ressemblances avec les symptômes de traumatismes. Il a notamment été montré qu'une personne traumatisée à une connectivité fonctionnelle entre plusieurs régions du cerveau différente en état de repos que des personnes sans traumatisme.

L'enjeu est donc de savoir si à la suite d'une expérience d'IA, la connectivité fonctionnelle du participant en état de repos peut être altérée. En effet, une altération de la connectivité fonctionnelle peut aussi être observée chez les personnes traumatisées. Finalement, cette recherche s'inscrit dans un questionnement visant à savoir si l'IA répétée provoque chez un individu une altération de la connectivité fonctionnelle, nécessitant alors de manière urgente une révision des pratiques de gestion.

Afin de simuler cette situation, une expérience d'IA, légère a été recréée en laboratoire et les sujets ont été placés dans un scanner à imagerie par résonance magnétique (IRM) afin de voir l'impact de cette situation sur leurs cerveaux. Il s'agit d'une duperie expérimentale afin de placer des participants dans une situation impossible alors qu'il leur est annoncé et renforcé que ça l'est. L'expérience consiste en la réalisation d'une série d'anagrammes. Pour un groupe de participants dit de contrôle, toutes les anagrammes sont réalisables. Pour un autre groupe de participants dit de test une série d'anagrammes sont impossibles bien qu'il leur soit affirmé le contraire. 14 participants ont été requis pour cette expérience. Ces deux groupes ont été placés dans un scanner

IRM afin de mesurer le signal d'oxygénation de leur sang appelé en anglais « Blood-Oxygen-Level-Dependent » (BOLD). De plus, le signal électrodermal a été capturé lors des séances afin de quantifier la réponse émotionnelle au test dans les groupes. Enfin, chaque sujet a réalisé avant la séance un test OCEAN (acronyme des axes de personnalité quantifiée par l'Ouverture d'esprit, la Conscienciosité, l'Extraversion, l'Agréabilité et le Névrotisme) quantifiant leur personnalité selon plusieurs variables de contrôle.

L'étude a montré que le temps moyen de résolution s'est révélé plus long significativement (presque deux fois plus) dans le groupe d'IA que dans le groupe contrôle. Le test OCEAN a montré que le trait du névrotisme est positivement corrélé à l'augmentation du temps de réponse chez les participants et augmente ainsi les conséquences de l'IA. En ce qui concerne l'activité cérébrale, l'analyse globale du cerveau des participants du groupe contrôle a révélé que l'activation d'une partie du DRN est corrélée avec la résolution de tâche ($z > 1.8$, correction sur les clusters de voxels à $p < 0.01$)[1] comme le suggérait les travaux de Maier et Seligman. Par ailleurs, le DRN dans le groupe d'IA comprenait plusieurs voxels ayant des z-statistiques élevés ($z > 3.75$, correction sur les clusters de voxels à $p < 0.1$). Enfin, une analyse complète du cerveau des participants en phase de repos a révélé des différences significatives dans la connectivité avec une régions du DMN, le précuneus cingulate cortex (PCC). Des études postérieures devront s'intéresser plus en détail sur les régions et les fonctions précises altérées en état de repos après l'expérience d'IA.

Mots-clés : Impuissance apprise, traumatisme, IRMf, signal électrodermale, test OCEAN, DRN, DMS.

[1] La z-statistique z est le score attribué à un voxel (pixel à trois dimension) qui est calculé à l'aide du modèle général linéaire (GLM) et qui caractérise la façon dont le signal temporel capturé sur ce même voxel corrèle l'évènement choisi comme étant une variable explicative du phénomène étudié. La Figure 3.1 tente une interprétation visuelle des étapes du GLM afin de comprendre plus facilement le sens derrière le score z.

ABSTRACT

In a corporate setting, employees undergo decision-making and problem-solving processes at each stage of their assigned tasks. These cognitive phenomena result from intricate internal processes that evoke emotions and engage multiple areas of the brain. These processes can be influenced by various biases and past experiences, impacting decision-making and problem-solving efficiency in the future. One phenomenon with a significant impact on this decision-making circuit is learned helplessness (LH), which manifests when an individual experiences a situation where failure seems inevitable. Consequently, the individual consistently anticipates failure, fostering a belief in their helplessness. This inability to overcome challenges negatively affects the decision-making circuit and the capacity to adequately solve problems. Since these skills are applied in domains beyond the impossible situation, alterations may have consequences in various real-life scenarios. It is noteworthy that LH-induced behaviors exhibit similarities with trauma symptoms. Studies have shown that a traumatized individual exhibits different functional connectivity between various brain regions during resting states compared to non-traumatized individuals.

The challenge is to find out whether the functional connectivity of the participant in the resting state can be altered as a result of an AI experiment. Indeed, altered functional connectivity can also be observed in traumatized individuals. Ultimately, this research aims to determine whether repeated exposure to LH induces alterations in an individual's functional connectivity, prompting an urgent need for a reassessment of management practices.

To simulate this situation, a mild LH experiment was recreated in a laboratory, with subjects placed in a magnetic resonance imaging (MRI) scanner to observe the impact on their brains. This experimental deception aimed to position participants in an impossible situation, despite being informed and reinforced that it was. The experiment involved solving a series of anagrams. For a control group, all anagrams were solvable, while for a test group, a series of anagrams was declared impossible, contrary to what was asserted. Fourteen participants were recruited for this experiment. Both groups underwent MRI scanning to measure blood-oxygen-level-dependent (BOLD) signals. Additionally, electrodermal signals were recorded during sessions to quantify emotional responses. Each participant also completed an OCEAN test (acronym for Openness, Conscientiousness,

Extraversion, Agreeableness, and Neuroticism) before the session, assessing personality across multiple control variables.

The study revealed a significantly longer average resolution time (almost twice as much) in the LH group compared to the control group. The OCEAN test demonstrated that the trait of neuroticism is positively correlated with an increase in response time among participants, thereby amplifying the consequences of LH. Regarding brain activity, the overall analysis of the control group's brains revealed that the activation of a portion of the dorsal raphe nucleus (DRN) is correlated with task resolution ($z > 1.8$, correction on voxel clusters at $p < 0.01$), as suggested by the works of Maier and Seligman. Furthermore, the DRN in the LH group included multiple voxels with elevated z-statistics ($z > 3.75$, correction on voxel clusters at $p < 0.1$). Finally, a comprehensive analysis of participants' brains during the resting phase unveiled significant differences in connectivity with a region of the default mode network (DMN), the precuneus cingulate cortex (PCC). Future studies will need to look in more detail at the precise regions and functions altered in the resting state after the AI experience.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XI

LISTE DES FIGURES XII

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS XIII

LISTE DES ANNEXES IV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4

2.1 Principe d'énergie libre, inférence active et cerveau Bayésien 4

2.2 Définition, cause et catégorisation de l'IA 6

2.3 Attributions, conséquences et coûts de l'IA dans les organisations 9

2.4 Conséquences et zones du cerveaux impliquées dans l'IA chez la souris 13

2.5 Extension de résultat des souris sur l'humain 17

2.6 Mesures en IRMf, signal BOLD, réponse galvanique, test OCEAN 19

2.6.1 Mesures en IRMf et signal BOLD 19

2.6.2 Système nerveux autonome sympathique : choix de la mesure 21

2.6.3 Questionnaire de personnalité OCEAN 22

2.7 Volume, densité neuronale et localisations des régions observées 23

2.8 Réseaux neuronaux et le cas du réseau de fonctionnement par défaut 25

2.8.1 Identification d'un réseau 25

2.8.2 Le default mode network (DMN) et la perception du soi en état de repos 25

2.8.3 L'impact d'un traumatisme sur les réseaux neuronaux 27

CHAPITRE 3 FORMULATION DU PROBLÈME ET CONSTRUCTION DU PROTOCOLE 29

3.1 Objectif principal 29

3.2 Objectifs secondaires 29

3.3 Contraintes influençant la méthodologie 31
3.3.1 Nombre de participants, planification et budgétisation 31
3.3.2 Sélection des anagrammes présentés 33

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: IMPACT OF LEARNED HELPLESSNESS ON COGNITIVE PERFORMANCE AND RESTING-STATE CONNECTIVITY: AN FMRI STUDY 36

4.1 Abstract 36
4.2 Introduction 37
4.3 Methods 41
4.3.1 Data Acquisition 41
4.3.2 fMRI Data Pre-Processing 45
4.3.3 fMRI Statistical Analysis 45
4.3.4 Statistical analysis for the other variables *47*
4.4 Results 47
4.4.1 OCEAN test *47*
4.4.2 Effect of LH on solvable anagram resolution 49
4.4.3 Relationship between anagram resolution and OCEAN test 50
4.4.4 Impact of LH on electrodermal activity changes 52
4.4.5 Activation of DRN and the anterior caudate nucleus in the control group 52
4.4.6 Stronger DRN activation in the LH group during tasks 53
4.4.7 rs-fMRI differences between the two groups 55
4.5 Discussion 56
4.6 Conclusion 61
4.7 Acknowledgements 61

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE 62

CHAPITRE 6 CONCLUSION 66

RÉFÉRENCES 67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Facteurs aggravant la probabilité d'induire l'IA pour un membre de l'organisation 12

Tableau 2.2. Estimation dans la littérature scientifique des tailles des zones d'intérêts étudiées. . 24

Tableau 3.1. Anagrammes solubles présentées en ligne. 34

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : schémas de l'interaction indirect entre un agent et son environnement 5
Figure 2.2 : schémas du principe de cerveau Bayésien.....6
Figure 2.3. Localisation du DRN 13
Figure 2.4. Localisation des noyaux caudates.....15
Figure 2.5. Localisation du vmPFC 16
Figure 2.6. Représentation du phénomène physique mesuré en IRM.....20
Figure 2.7. Cartes de probabilité de plusieurs régions du DMN.....27
Figure 3.1. Illustration des étapes du modèle général linéaire. 30
Figure 3.2. Chronologie du protocole expérimental soumis au comité d'éthique.. 32
Figure 4.1. **(a)** fMRI scans are acquired during the resolution phase 43
Figure 4.2. Spearman correlation matrix of the correlation between the OCEAN test.....48
Figure 4.3. Relationship between the anagram response time and the OCEAN personality test. .51
Figure 4.4. Z-statistic map for control group participants obtained from higher-level analysis...53
Figure 4.5. Z-statistic map for LH participants obtained from second-level analysis. 54
Figure 4.6. Z-statistic map for groups participants obtained from second-level analysis.....55
Figure 4.7. Z-statistic map for groups participants obtained from higher-level analysis.....56

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

Cette liste présente les symboles et les abréviations utilisées dans le mémoire dans l'ordre alphabétique :

5-HT	5-hydrotryptamine
B0	Longitudinal magnetic field
BOLD	Blood-oxygen-level dependent
BET	Brain extraction tool
CAD	Canadian Dollar
CCA	Cortex Cingulate Antérieur
DLS	Striatum dorsolatérale
DMN	Default Mode Network
DMS	Dorsomédiale Striatum
dPAG	Zone dorsale périaqueducale grise
DRN	Noyau du Raphé dorsale
EPI	Echo planar imaging
fMRI	IRMf / Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
FMRIB	Functional Magnetic Resonance Imaging of the Brain
FSL	FMRIB Software Library
GABA	Acide gamma-aminobutyrique
GSR	Galvanique skin response / Réponse galvanique de la peau
HRF	Hemodynamic response function/fonction de la réponse hémodynamique
IA	Impuissance apprise
I-I-P	Impossible – impossible – possible (solubilité des anagrammes)
mdTN	noyau du thalamus dorso-médiale
MNI	Montreal Neurological Institute
MR	Magnetic resonance

OCEAN /Névrotisme	Ouverture d'esprit/ Consciosité / Extraversion / Agréabilité
P-P-P	Possible – possible – possible
ROI	Region of interest / région d'intérêt
RS	Resting state / état de repos
SN	Substantia Negra / substance noire
T	Tesla
T1	Longitudinal relaxation time
T2	Transverse relaxation time
T2*	Effective transverse relaxation time
TR	Repetition time
TSPT	Trouble de stress post-traumatique
UNF	Unité de neuroimagerie fonctionnelle
vmPFC	Prefrontal Cortex Ventromedial / Cortex préfrontal ventro-médiant

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : ANALYSE DES PRE-DONNÉES DES TESTS D'ANAGRAMMES 76
ANNEXE B : CODE POUR L'AFFICHAGE DE LA FIGURE 3.1 79
ANNEXE C : CODE DE L'AFFICHEUR DANS L'IRM 81
ANNEXE D : CODE DU TRAITEMENT DES DONNÉES : SIGNAL ÉLECTRODERMAL ..85
ANNEXE E : CODE DU TRAITEMENT DES DONNÉES DU TEST OCEAN 98
ANNEXE F : CODE DU TRAITEMENT DES DONNEES DU SIGNAL FONCTIONNEL ...103
ANNEXE G : QUESTIONNAIRE À CHOIX MUTLIPLE : TEST OCEAN 116

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La pratique commune de gestion dans les organisations est inspirée du courant comportemental (behavioriste) visant à récompenser les comportements souhaités pour maximiser leur occurrence et punir ceux non souhaités afin d'éviter leur reproduction. Ces mécanismes se trouvent dans la plupart des organisations modernes telles les structures gouvernementales ou encore les grands groupes industriels. Par ailleurs, ces comportements sont récompensés ou punis par le biais des résultats transmis par des indicateurs détachés des comportements réels des individus. Cette focalisation sur les indicateurs et la quête de performance portée sur les individus tendent à masquer les mécanismes permettant de bien performer et ainsi de comprendre comment agir pour être récompensé. Sans un processus clair, le personnel n'est pas guidé et peut se voir punit pour des performances dont il ne peut pas être maître, s'attribuant des erreurs qui ne sont pas les leurs. Il faut parler d'impuissance apprise (IA) lorsque les personnes se sentent incapables de répondre aux problématiques qu'elles rencontrent, développent un comportement de résignation et se considèrent impuissantes. Ce sentiment d'impuissance favorise l'inaction. Par conséquent, certaines problématiques peuvent ne jamais être résolues puisque le personnel a appris à ne plus les signaler ni à les résoudre. En effet, des comportements organisationnels enracinés dans la culture de l'entreprise peuvent échapper à toute remise en question, étant perçus comme des éléments constitutifs fondamentaux de ladite organisation. Ces problématiques incluent le manque d'initiative car les individus ont appris à anticiper l'échec, une faible communication car ils ont appris que leur contribution ne fera aucune différence, un comportement conformiste car ils ont appris qu'ils n'ont pas le pouvoir de changer les pratiques inefficaces et l'acceptation de la médiocrité puisqu'ils se sont résignés à ne pas pouvoir améliorer leurs résultats (Martinko et Gardner, 1982). D'autre part, des comportements socialement problématiques peuvent ne pas être signalés et arrêtés à cause de ce phénomène car les individus ont appris qu'ils n'ont aucun pouvoir sur ces situations (Thacker, 1992). Ainsi, une culture de l'impuissance apprise peut durablement s'ancrer dans la culture d'une organisation à cause de cette résignation et de cette passivité induites. Finalement, cet apprentissage de l'inaction créé d'énormes problèmes dans le fonctionnement à tous les niveaux d'une organisation.

Par ailleurs, il est connu qu'une expérience douloureuse répétée ou unique, peut engendrer des symptômes traumatiques chez les individus qui en font l'expérience (Van Der Kolk, 1998). Il a

déjà été montré que les personnes traumatisées avaient un réseau en fonctionnement par défaut, de l'anglais « Default Mode Network » (DMN) (Shulman et *al*., 1997), qui diffèrent des personnes non traumatisées (Kennis et *al*., 2016). Le DMN est notamment associé au mode dans lequel l'individu va rentrer en réflexion sur lui-même et est donc notamment associé à l'estime de soi. En effet, le DMN, lors de l'expérience d'expérience traumatisante, est durablement modifié et les connections entre plusieurs régions du cerveau sont altérées.

La question générale de cette recherche est de savoir si l'IA induit des modifications visibles à court terme (diminution du nombre de bonnes réponses, temps de réflexion plus long, intensité émotionnelle plus élevée) sur les participants et plus particulièrement si l'IA induit une modification de la connectivité des régions du cerveaux avec les régions associées au DMN. Cette douleur transmise pourrait peut-être avoir des conséquences durables sur les employés et ainsi nuire à leur bien-être et par conséquent nuire à leur productivité et au développement de leur organisation. Ainsi, cette question est primordiale dans la thématique de la gestion des équipes et de l'amélioration continue car elle mène à une nouvelle façon de penser la gestion des ressources humaines. Advenant que l'hypothèse soit vraie, il serait préférable de donner des balises claires et précises aux employés afin qu'ils puissent réaliser leurs travaux adéquatement et donner leur plein potentiel. Cela pourrait constituer alors une base neuroscientifique aux bonnes pratiques du lean manufacturing.

Afin de tester cette hypothèse, cette étude a fait passer un test à un groupe de participants conçu pour déclencher le phénomène de l'IA, à savoir la résolution d'anagrammes insolubles dans le scanner IRM. Deux groupes ont été formés, un groupe soumis à l'IA auquel a été assigné des anagrammes insolubles et solubles et un groupe de contrôle auquel n'a été assigné que des anagrammes solubles. Les données nécessaires ont été recueillies au moyen d'un scanner par imagerie par résonance magnétique (IRM) 3 Tesla. Par ailleurs, le signal de la conductance de la peau a été acquis à l'aide du système BIOPAC MP160 et du logiciel Acknowledge software (https://www.biopac.com/product/mp150-systems-with-ndt/) afin d'être utilisé comme étant un indicateur fiable de la réponse émotionnelle du participant. Par ailleurs, la personnalité a été évaluée selon les 44 questions du test OCEAN (acronyme d'Ouverture d'esprit, Conscienciosité, Extraversion, Agréabilité et Névrotisme) quantifiant selon 5 axes la personnalité d'un individu.

Dans la suite de ce mémoire, il est d'abord réalisé l'examen des connaissances antérieures concernant l'IA afin d'en connaître les causes, les conséquences individuelles et organisationnelles, les outils pour son étude et les processus neurologiques derrière ce phénomène. Ceci constitue la revue de littérature dans le CHAPITRE 2. Dans le CHAPITRE 3 est décrit la construction des hypothèses, des modèles et de la séance d'IRM permettant la mise en place des objectifs de la recherche. Dans le CHAPITRE 4 est présenté l'article, comportant en addition des précédents chapitres, la méthodologie et les principaux résultats de l'étude de façon concise. Puis, le CHAPITRE 5 permet la discussion générale de cette recherche sous l'analyse des sous-objectifs élaborés précédemment et s'essaie à proposer les prochains axes de recherches concernant l'IA. Enfin, le CHAPITRE 6 s'essaie à montrer l'importance et les conséquences potentielles de l'IA dans une organisation impliquant la nécessité de revisiter les méthodes de gestion.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre s'essaie à parcourir l'ensemble de la recherche pertinente vis-à-vis de l'impuissance apprise (IA) concernant sa description en termes de ses causes, de ses conséquences et de l'utilisation qui en est fait pour décrire d'autres phénomènes psychologiques (e.g. la dépression, le traumatisme). La première partie de la recherche, s'est intéressée à l'identification des thématiques pour comprendre la question de recherche. Il s'est révélé que l'impuissance apprise est liée à certaines thématiques telles que la création de croyances et à l'émergence du sens chez l'être humain. Par conséquent, ce sujet est pluridisciplinaire puisqu'il trouve sa source dans des questionnements de sécurité et de bien-être au travail ainsi que dans les recherches les plus actuelles en neurosciences. Ainsi, cette étude est d'abord poussée par la recherche industrielle qui s'essaie à utiliser les méthodes de recherche en neurosciences pour justifier ensuite les recherches futures sur des nouvelles méthodes et des nouvelles pratiques industrielles. Ce lien entre ces thématiques justifie l'axe de recherche réalisé sur la modélisation du fonctionnement cérébral par le modèle Bayésien qui modélise la création des croyances afin de comprendre la nature de l'IA. D'autres modèles auraient aussi pu servir à comprendre la création de la croyance tels que la théorie comportementale ou la théorie des construits de Kelly . C'est une tentative pour modéliser la mise à jour des croyances et ainsi comprendre l'origine de la durabilité du sentiment d'impuissance créée après des expériences où un sentiment de perte de contrôle a été ressenti. Puis, la revue de littérature réalise la chronologie des connaissances de l'IA chez les animaux (chiens et souris) puis chez l'humain. Cette recherche se portera d'abord en détail sur les études de Maier et Seligman jusqu'aux études les plus récentes. Cette revue de littérature s'essaie notamment à donner une définition de l'IA puis à comprendre les causes et les situations qui l'engendrent. Enfin, la littérature va aux outils et à la difficulté de la mesure de l'IA chez les humains. Cette recherche bibliographique se conclura par un retour sur le questionnement.

2.1 Principe d'énergie libre, inférence active et cerveau Bayésien

Le principe d'énergie libre (free-energy principle) est une modélisation mathématiques des sensations, de la perception, de l'apprentissage ainsi que de la prise de décision (Friston, 2010). Cette théorie fait le lien entre la probabilité qu'un évènement ait lieu vis-à-vis d'une action externe présentée et des connaissances précédemment acquises par l'agent dont le comportement est ausculté. C'est une modélisation des états internes de l'acteur en fonction des sensations qu'il reçoit

et des actions qu'il peut engendrer et par les signaux induit par celui-ci. La Figure 2.1 ci-dessous représente une version simplifiée proposée par Friston en 2012 de l'interaction entre l'état interne d'un agent, de l'état de son environnement, de ses actions et de ses sensations.

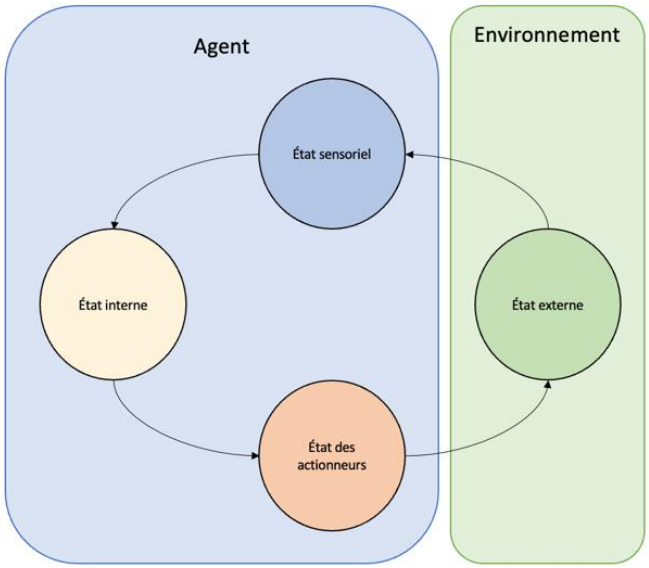

Figure 2.1 : schémas de l'interaction indirect entre un agent et son environnement : modification simplificatrice de la figure utilisée dans l'article de Karl Friston « Free Energy, Value, and Attractors » sous license « Creative Commons Attribution 3.0 Unported ».

L'un des fondements du principe de l'énergie libre est que l'agent s'adapte afin de minimiser la surprise (Friston, 2010) qu'il reçoit de son environnement à travers les entrées sensorielles (vue, ouïe, odorat, toucher, goût). Selon cette théorie, les mécanismes de mise à jour des croyances se définissent à travers l'optimisation des liens entre l'état interne, l'état sensoriel et l'état des actionneurs afin de minimiser le résultat prédis à la suite d'une action sur l'environnement. Cette optimisation peut être théorisée selon un processus Bayésien permettant de mettre à jour les croyances précédemment construites suites aux nouvelles expériences de l'agent comme ce qui est montré dans la Figure 2.2 ci-dessous.

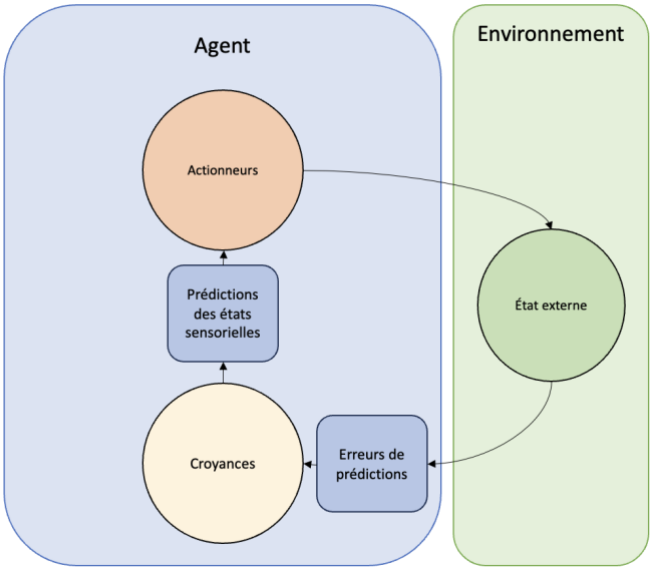

Figure 2.2 : schémas du principe de cerveau Bayésien. Cette figure illustre le concept de cerveau Bayésien. Les croyances construites sur les expériences passées de l'agent permettent la construction de prédictions sur la vraisemblance d'un évènement à la suite d'une action. Le but est la minimisation de l'erreur de prédiction à l'issue de l'action. Les croyances sont alors mises à jour afin d'optimiser la prédiction future sur ce même évènement.

Le principe du cerveau Bayésien peut être utilisé pour expliquer les processus internes de création de croyance et il est utilisé ici pour comprendre des phénomènes complexes. Usuellement, le principe du cerveau Bayésien est un modèle computationnel, c'est à dire qui permet la simulation sur ordinateur à l'échelle des neurones, des circuits ou des systèmes neurologiques (Doya, 2007). Il est utilisé ici à plus haut niveau à des fins de compréhension de l'IA et de son impact possible sur les systèmes de création de croyance. La section suivante s'intéresse alors à la façon dont ce processus de création de croyance pourrait être altéré par l'IA.

2.2 Définition, cause et catégorisation de l'IA

Le processus Bayésien précédemment décrit est court-circuité par l'événement induisant l'IA. En effet, dans certaines situations, les démarches d'actions ne produisent aucun effet ne pouvant jamais influencer la diminution de l'erreur de prédiction. La mise à jour des croyances est alors altérée et cela cause la passivité de l'agent. Ce mécanisme est à la base d'une stratégie de gestion du danger : l'immobilisme. Ce phénomène peut se retrouver dans de nombreuses situations de la

vie courante. En effet, beaucoup de membres d'organisations, malgré leurs efforts constants et dévoués à leur travail, peuvent faire régulièrement l'objet d'évaluations défavorables et peuvent ne pas être retenus pour une promotion. Ces échecs peuvent survenir en dépit de leurs qualifications et de leurs compétences. Au fil du temps, ces individus pourraient commencer à croire que leurs actions ne peuvent pas influencer leur situation professionnelle, et elles commenceront à ressentir un sentiment d'impuissance face à leur situation. Dans ce scénario, ces individus peuvent finalement choisir de ne plus chercher d'améliorations ou d'opportunités d'évolution de carrière, devenant passifs dans leur approche des défis liés au travail. Par ailleurs, le phénomène d'IA pourrait aussi être expliqué à l'aide de la théorie comportementale où des comportements qu'ils soient adaptés ou non auraient fait l'objet de punitions induisant de la confusion quant à la démarche à suivre par l'employé. Dans la théorie des constructions mentales de Kelly (Epting et Paris, 2006), l'IA se traduirait par construction mentale changeante des construits ne permettant pas de prévoir une réponse appropriée sur une situation.

En fin de compte, l'action n'exerce aucune influence sur l'évènement qui est censé en découler. Lorsque plusieurs évènements de ce type ont lieu lors de l'expérience d'un agent, celui-ci peut se construire la croyance qu'il est impuissant face à la situation et que la meilleure action à réaliser est de ne rien faire. Ainsi, l'IA se traduit par ce phénomène de résignation face à une situation qui nécessiterait une action. C'est-à-dire qu'un individu résout la situation à laquelle il est confronté en étant passif et en laissant la tourmente passer. L'IA vient paralyser le système d'inférence active sur le long terme et ainsi rompre le lien classique entre action et évènements prédits. Il est aussi important de différencier ce phénomène du réflexe « freeze » ou « mobilité tonique » (Schmidt et *al*., 2008) dans les réflexes « fight/flight/freeze » (FFF). En effet, le phénomène de « freeze » découle d'une situation très stressante et paralysante frappant l'agent subitement au contraire de l'IA qui n'implique pas forcément la paralysie physique. L'IA serait plutôt une passivité conceptuelle, une forme de renoncement. Afin d'évaluer et de catégoriser l'IA, certains chercheurs se sont penchés sur les différentes catégories qui la définissent. Elle peut concerner de nombreuses thématiques comme les liens sociaux, les problèmes cognitifs, les dilemmes moraux ou encore les problèmes organisationnels.

Le phénomène d'IA a d'abord été découvert sur des animaux. En effet, ce sont Maier et Seligman qui ont montré en 1976 qu'un chien ne cherchait plus à s'échapper de chocs électriques répétés même dans le cas où il y avait une issue possible après avoir « appris l'impuissance » (Maier et

Seligman, 1976a). L'apprentissage de l'impuissance signifie ainsi que l'animal s'est résigné à subir ce choc électrique et a appris qu'il n'y avait pas de possibilité d'y échapper. Ce phénomène se retrouve aussi chez les êtres humains. En effet, lorsqu'un individu est soumis à un objectif irréaliste ou inatteignable, qu'il a le sentiment de ne pas avoir le contrôle sur les conséquences et que cette situation se répète alors il peut développer l'état d'IA. L'identification de l'IA a évoluée dans les années 70. L'hypothèse initiale selon Maier était que le sujet apprend au fil des essais que le résultat est indépendant des tentatives qu'il produit. Cette hypothèse de non-contingence entre le résultat et les actions a donc été la première des idées sur l'origine de l'IA (Maier et Seligman, 1976a). L'IA ne doit donc pas être confondue avec le phénomène de la frustration, qui est vécue par les individus lorsqu'ils rencontrent une tâche complexe. En effet, la caractéristique essentielle de l'IA réside dans la perception du contrôle sur la situation, tandis que la frustration se manifeste par l'absence de récompense, que ce soit sous forme physique, ou résultant de la résolution du problème ou d'autres formes. Ainsi, il est possible que le DRN se désactive lorsque le contrôle est perçu, mais que l'individu subisse tout de même des effets de la frustration. Bien que certaines zones cérébrales soient communes aux deux phénomènes, telles que le vmPFC, le dPAG ou les amygdales (Maier & Seligman, 2016; Yu et al., 2014), il n'est pas mentionné l'implication du DRN dans la littérature concernant le phénomène de frustration. Ainsi, cette étude vise à placer certains participants dans un état d'impuissance à travers des situations dans laquelle le sujet n'a aucun contrôle et non pas dans des situations difficiles.

En ce qui concerne l'IA, des études postérieures précisent son origine et montre qu'elle est en fait diverse et se distingue selon trois dimensions (Abramson et Seligman, 1978). La première dimension évoquée par Abramson et *al* est l'axe opposant l'impuissance attribuée à des facteurs externes face à l'impuissance attribuée à des facteurs internes. Dans le premier cas, l'individu identifie la cause de son impuissance à des éléments externes à son propre champ d'action. Dans le second cas, il identifie son impuissance à sa propre incapacité à répondre à la situation, c'est-à-dire à un ou des éléments internes qui lui sont propres. Alors, une attribution d'un échec à des causes internes induit une plus grande perte d'estime de soi qu'une attribution à des causes extérieurs et induit plus de passivité (Abramson et Seligman, 1978). La seconde dimension identifiée par Abramson et *al* est l'étendue des domaines qu'affecte l'IA chez l'individu. D'un côté de cet axe hypothétique se trouve l'IA globalisé, c'est-à-dire qui affecte le sujet dans de nombreuses situations différentes et sphères de sa vie. De l'autre se trouve l'impuissance spécifique qui affecte

l'individu dans des situations précises et face à certains facteurs en particulier. Ainsi, l'identification d'un échec à des causes globales induit de l'IA dans une plus grande panoplie de situations nouvelles et entraîne une plus grande réaction dépressive à la suite d'un nouvel évènement négatif (Metalsky et al., 1982). Enfin, la dernière dimension évoquée par Abramson et *al* est celle de la « stabilité » des facteurs impliquant l'IA (Abramson et Seligman, 1978), c'est-à-dire la récurrence de facteurs dans une situation entrainant l'IA. Ainsi, un facteur stable est un facteur qui cause systématiquement l'IA tandis qu'un facteur instable est un facteur qui entraîne éventuellement celle-ci. Une personne attribuant son échec à des causes stables sera plus souvent sujette aux symptômes de l'IA dans la situation donnée. Finalement, ces différentes dimensions permettent de catégoriser l'IA comme un phénomène multidimensionnel pouvant se nuancer à travers sa stabilité, son étendue catégorielle (c-à-d sa globalité), et sa distance conceptuelle à l'agent. Cette étude s'essaie à provoquer de l'IA stable mais ne s'intéresse pas à soumettre des tâches très personnelles ni d'un haut niveau d'étendue catégorielle. Ainsi, cette recherche s'intéresse à soumettre un unique type de problème cognitif qui n'est pas relié personnellement à la vie du participant comme ce qui est évoqué dans la section 4.3.1.

2.3 Attributions, conséquences et coûts de l'IA dans les organisations

Les organisations et les entreprises peuvent chercher à devenir plus efficientes, productives et ou avoir une ligne conductrice clair sur ce qu'elles veulent construire, transformer ou apporter à leur environnement. Pour parvenir à ce but, les organisations peuvent porter cette recherche de productivité sur les ressources humaines. Cependant, une mauvaise compréhension des besoins et des mécanismes pour améliorer cette productivité implique la formulation de directives imprécises. Par conséquent, ces directives mal formulées peuvent induire un sentiment de perte de contrôle et de perte de sens dans la réalisation des missions quotidiennes des employés puisque leurs respects ne mènent pas toujours aux résultats escomptés. Les employés se créée alors la croyance de leur propre impuissance face aux missions qui leur sont demandées. Ainsi, de nombreux problèmes au sein des organisations découlent des croyances des employés selon lesquelles ils ne peuvent pas changer les résultats par leurs efforts (Martinko et Gardner, 1982). Par ailleurs, Martinko et Gardner ont identifié plusieurs causes internes ou externes pouvant être des « stimulateurs » de l'IA, c'est-à-dire qui augmente la probabilité de son occurrence chez une personne.

La première dimension évoque les "stimulateurs" tels que : la structure organisationnelle, le système d'évaluation des performances, le système de récompenses, les changements technologiques interne répétés (pour communiquer, informer, évaluer), les caractéristiques des gestionnaires, et des facteurs liés à la difficulté des tâches, ont été répertoriés en tant que "stimulateurs de l'environnement interne". En revanche, les valeurs sociales, les conditions économiques, politiques et légales ont été répertoriées en tant que "stimulateurs de l'environnement externe".

Cependant, les stimulateurs externes et les expériences passées ne suffisent pas à provoquer l'impuissance. En effet, les attributions internes sont présentées comme le principal déterminant de l'impuissance (Martinko et Gardner, 1982). L'attribution est en psychologie le moyen d'évaluer un sujet à travers l'association d'un évènement ou du comportement d'une personne à une cause pouvant l'expliquer. Dans ce cas, si un employé attribue sa mauvaise performance à une dimension stable et interne, il est plus susceptible d'adopter des signes d'impuissances. Un employé qui associe les évènements à des causes internes[2] est considéré comme plus vulnérable à l'impuissance. De plus, le développement de l'impuissance dépend de l'estime de soi des individus (Carlson et Kacmar, 1994).

Néanmoins, bien que le développement de l'impuissance dépende des perceptions individuelles, il est impossible de nier le rôle des facteurs organisationnels qui peuvent réduire le sentiment d'accomplissement et de contrôle sur les résultats du travail. En ne laissant aucune place à la prise de décision et à l'initiative, à l'augmentation des normes et des procédures peuvent réduire le sentiment de contrôle des employés, les rendant ainsi plus vulnérables à l'IA. Les employés travaillant dans des organisations bureaucratiques qui s'appuient sur des règles et des politiques formelles ont souvent le sentiment d'impuissance parce qu'ils sont incapables de déterminer les méthodes de travail et de décider des questions liées au travail. L'employé a ainsi une perception de non-contingence entre le comportement et les résultats (c'est à dire aucun lien causal entre l'action de l'agent et les évènements), qui constitue le cœur de l'impuissance décrit par Maier et Seligman. En effet, le manque d'autonomie dans les organisations augmente l'impuissance (Ashforth, 1990) et au contraire trop d'autonomie peut « perdre » l'employé sur ce qu'il lui est

[2] C'est-à-dire un locus de contrôle interne.

réellement demandé et ainsi provoquer l'impuissance comme l'illustre l'expérience des « Red Beads » de Deming (cité par Gartner et Naughton, 1988).

En addition, les caractéristiques intrinsèques au poste peuvent aussi augmenter le risque d'induire un sentiment d'IA. En effet, une charge de travail élevée, des conflits de rôle et de l'ambiguïté, peuvent jouer un rôle dans son développement. Un poste dans lequel il y a de l'ambiguïté, du conflit de rôle, de la tension, du stress et de l'épuisement, sont reliés à l'IA (Tubre et Collins, 2000). De plus, l'impuissance est aussi reliée à des facteurs de stress liés aux délais et avec le soutien de la hiérarchie (Tayfur, Ö. et Arslan, M., 2012). En effet, une charge de travail élevée et une augmentation du conflit entre travail et vie de famille augmente l'impuissance, tandis que le soutien du superviseur atténue celle-ci.

Ainsi, les organisations peuvent induire l'impuissance lorsque les structures et les mécanismes inhérents à l'organisation induisent un sentiment de perte contrôle des employés. Les facteurs organisationnels, en plus des facteurs individuels, pouvant induire avec plus chances le phénomène d'IA sont résumés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1. Facteurs aggravant la probabilité d'induire l'IA pour un membre de l'organisation.

<table>
<tr><th>Externe à l'agent</th><th>Interne à l'agent</th></tr>
<tr><td>Interne à la structure</td><td rowspan="8">• Style d'attribution pessimiste (le fait d'expliquer un résultat peu favorable par des caractéristiques internes, stables et globales ou un résultat favorable avec des caractéristiques externe, instable et spécifiques).
• Avoir un besoin de contrôle interne
• Avoir peu de motivation
• Avoir un score plus élevé de névrotisme induit une plus grande probabilité d'avoir des symptômes d'IA
• Avoir un score plus faible d'agréabilité induit une plus grande probabilité d'avoir des symptômes d'IA</td></tr>
<tr><td>• Une structure très centralisée et formalisée
• Mise en place d'objectifs inadaptés aux compétences des employés
• Un système d'évaluation des performances ne reliant pas l'effort et la performance à la récompense
• Des postes exigeants impliquant des tâches difficiles et complexes
• Un style de direction inadéquat (dogmatique, tyrannique, rigide)
• Un manque de responsabilisation et de leadership participatif
• Des changements technologiques soudains et constants</td></tr>
<tr><td>Interne au rôle</td></tr>
<tr><td>• Grosse charge de travail
• Ambiguïté des missions
• Conflit entre rôle
• Objectifs de poste non-atteint
• Peu d'alternative pour changer de missions</td></tr>
<tr><td>Externe à la structure</td></tr>
<tr><td>• Un marché de l'emploi saturé
• Des conditions économiques difficiles</td></tr>
</table>

Finalement, une organisation peut générer chez ses employés le phénomène d'IA à travers sa structure, la façon dont elle opère et sa culture. Les individus subissant l'IA sont alors rendus passif à la violence et la souffrance qu'ils subissent. L'origine de cette incapacité chez les humains à réagir aux problématiques néfastes se trouve dans la façon dont interagissent différentes zones du cerveau. De nombreuses études, dont Maier et Seligman ont contribué, ont étudié le phénomène de l'IA dans le cerveau des souris. Une synthèse des résultats de neuroscience de l'IA chez l'humain est ensuite réalisée par la suite.

2.4 Conséquences et zones du cerveaux impliquées dans l'IA chez la souris

L'étude de l'IA chez des souris a permis de montrer que certaines zones du cerveau jouent un rôle prépondérant et mesurable lors d'un phénomène d'IA. Les informations qui suivent sont principalement tirées de l'article de Maier et Seligman de 2016 qui réalise un état de l'art de l'étude de l'IA des années 70 à 2016. En effet, le noyau du raphé dorsale (Dorsal Raphe Nucleus : DRN en anglais) chez la souris comme chez l'humain (Charnay et Leger, 2010) (voir la Figure 2.3 ci-dessous) joue un rôle clair dans l'émission de sérotonine 5-HT entraînant la modification du fonctionnement de zone comme les amygdales ou la zone dorsale périaqueducale grise (dPAG).

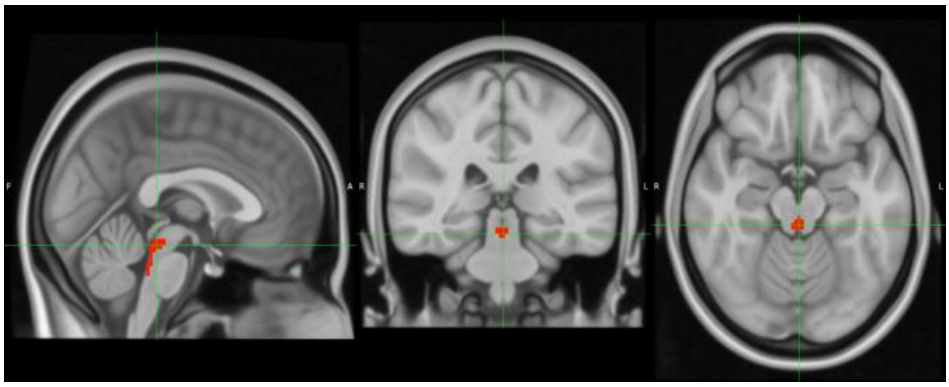

Figure 2.3. Localisation du DRN : Capture d'écran extraite du logiciel FSL (Smith et *al.*, 2004). Le croisement des lignes vertes indique la localisation du DRN. Il y a ici 3 vus de plans respectivement sagittal, coronal et axial. La localisation du DRN a été obtenu à l'aide de l'étude de Anand et al. (Anand et *al.*, 2019). Le *patron* utilisé est le « MNI152_T1_0.5mm » signifiant que le *patron* est dans l'espace usuel MNI, qu'il est tiré de la moyenne de 152 cerveaux de personnes en bonne santé, que l'image est T1-weighted, et que la résolution des voxels est de 0,5 mm^3.

La Figure 2.3 ci-dessous permet de localiser le DRN sur les plans sagittal, coronal et axial chez l'être humain sur le patron « Montreal Neurological Institute » (MNI) qui représente le cerveau moyen de 152 participants en santé (Fonov et *al.*, 2011).

D'une part, la zone dPAG a montré un rôle dans le système de fuite / de lutte / d'immobilité (fly/flight/freeze) (Graeff et *al.*, 1997) et d'autre part le système de l'amygdale étendue (comprenant le lit du noyau strie terminale/stria terminalis) régule la peur et l'anxiété (Graeff et *al.*, 1997). De plus, il a été montré par (Grahn et *al.*, 1999) que le DRN était fortement activé lors d'une situation stressante et que cette zone reste activée lorsque le sujet est soumis à une situation où aucune issue favorable n'est perceptible. C'est-à-dire que cette zone continue d'être activée lorsque le sujet est dans une situation qui est de nature incontrôlable mais se désactive lorsque la situation est contrôlable. En effet, lorsque la situation est détectée comme contrôlable le circuit du cortex préfrontal ventro-médiant (ventro-medial prefontal cortex : vmPFC en anglais) s'active et son activation est suffisant pour induire l'inhibition du DRN (Amat et *al.*, 2008). Ainsi, ces articles montrent que la présence d'une situation stressante incontrôlable a un impact sur des zones comme les amygdales et le dPAG dus au DRN et de ses émissions de 5-HT. Comme mentionné, il a été montré que le DRN reste activé lorsque la situation est incontrôlable (Grahn et *al.*, 1999) mais l'effet positif inverse est aussi observable. En effet, l'étude de Amat et al. de 2010 montre que lorsqu'un sujet est soumis à un choc auquel il existe une échappatoire alors le striatum dorso-médial (Dorso Medial Striatum : DMS en anglais) (qui est une région interne aux noyaux caudates présentée chez l'être humain dans la Figure 2.4**)** entraîne l'activation du circuit inhibitoire du vmPFC vers le DRN (Amat et *al.*, 2010). L'activation de ce circuit entraine alors la désactivation du DRN et donc l'arrêt de l'émission de 5-HT.

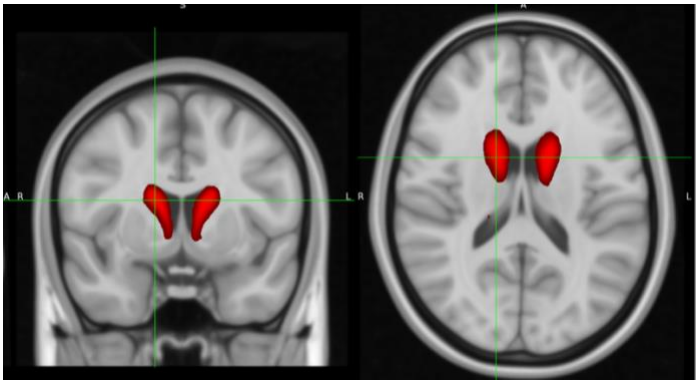

Figure 2.4. Localisation des noyaux caudates : Capture d'écran extraite du logiciel FSL (Smith et *al.*, 2004). Le croisement des lignes vertes indique la localisation du noyau caudate gauche. Il y a ici deux vus de plans respectivement coronal et axial. La segmentation est en rouge. Il semble que la segmentation proposée par l'atlas « Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas » recouvre une partie des ventricules. Le *patron* utilisé est le « MNI152_T1_0.5mm » signifiant que le *patron* est dans l'espace usuel MNI, qu'il est tiré de la moyenne de 152 cerveaux de personnes en bonne santé, que l'image est T1-weighted, et que la résolution des voxels est de 0,5 mm^3.

Dans son article de 2016, Maier et al. rappelle que la communauté scientifique tend à penser que l'activation du DRN est nécessaire (Will et *al.*, 2004) et suffisante (Maier et *al.*, 1995) à provoquer un phénomène de passivité et d'anxiété chez le sujet. En effet, la nécessité est montrée en bloquant l'activation du DRN inhibant ainsi la passivité et l'anxiété après un choc incontrôlable (Maier et *al.*, 1993). Par ailleurs, l'article de Maier et al. de 1995 démontre que l'activation volontaire du DRN à l'aide du neurotransmetteur GABA induit chez les sujets des comportements similaires à ceux observés chez des sujets victimes d'impuissances acquises ce qui montre la suffisance (Maier et *al.*, 1995). Ainsi, l'article de Maier et al. de 2016 montre qu'il existe de forts indices d'une équivalence entre l'activation du DRN et la passivité/l'anxiété après un choc incontrôlable.

La communauté scientifique dans ce domaine cherche ensuite à déterminer la zone antécédente au DRN qui lui envoie un signal différent entre la situation contrôlable et incontrôlable. Le vmPFC est présenté chez l'être humain dans la Figure 2.5 ci-dessous. Le vmPFC est en amont de l'activation du circuit inhibiteur du DRN (Maier et Seligman, 2016).

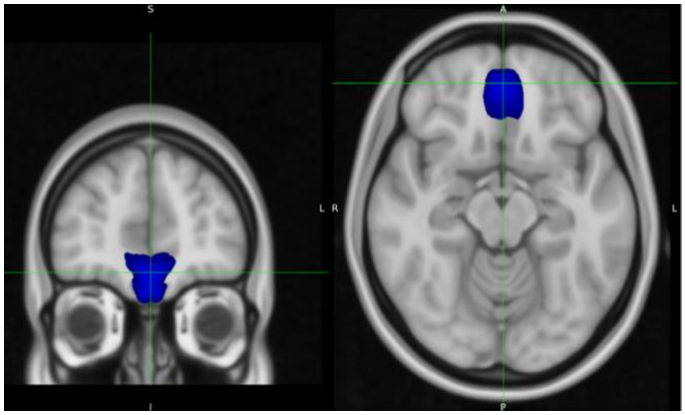

Figure 2.5. Localisation du vmPFC : Capture d'écran extraite du logiciel FSL (Smith et *al.*, 2004). Le croisement des lignes vertes indique la localisation du vmPFC. Il y a ici deux vus de plans respectivement coronal et axial. La segmentation est en bleu. L'atlas utilisé est le « Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas ». Le *patron* utilisé est le « MNI152_T1_0.5mm » signifiant que le *patron* est dans l'espace usuel MNI, qu'il est tiré de la moyenne de 152 cerveaux de personnes en bonne santé, que l'image est T1-weighted, et que la résolution des voxels est de 0,5 mm^3.

La nécessité de l'action de ce circuit inhibiteur est démontrée par l'étude d'(Amat et *al.*, 2005)qui, en bloquant la connexion entre le vmPFC et le DRN, montre qu'une situation contrôlable a le même effet sur le DRN qu'une situation qui est de nature incontrôlable. C'est-à-dire qu'elle provoque la passivité et l'anxiété lors de futurs essais même lorsque l'élément stressant est de nature contrôlable. Cela signifie donc que le vmPFC est une structure en amont du DRN pouvant inhiber l'action du DRN lorsque la contrôlabilité du facteur stressant est détectée. De plus, l'étude d'(Amat et *al.*, 2014) montre que le striatum postérieur dorso médial (DMS) communique en amont du vmPFC et détecterait possiblement la contrôlabilité. Par ailleurs, il y a une différence de faite entre le circuit du système « action/événement » et le circuit du système des habitudes. Le premier utilise le principe de contingence qui est la différence faite entre la probabilité d'un événement à la suite d'une action par celle sans cette même action. Il est flexible et s'adapte rapidement. Le second est plus utilisé par habitude, c'est-à-dire qu'il est inflexible et que le signal qu'il émet n'évolue pas en temps réel. Ce premier système implique justement le DMS et le système prélimbique situé dans le cortex préfrontal tandis que le second implique le cortex sensorimoteur et le striatum dorsolatéral (DLS). Cette étude ne fait pas intervenir le système des habitudes, les facteurs stressants étant à priori non-habituels pour les participants (résolution d'anagrammes). Enfin, l'étude de Barratta et

al. de 2019 identifie d'autres zones supplémentaires impliquées dans la détection de la contrôlabilité (Baratta et Maier, 2019) tel que la substantia negra (SN) et la sous-région du thalamus dorso-médiale.

Finalement, les études de Maier et Seligman permettent de comprendre l'intrication entre plusieurs régions du cerveau des souris dans le phénomène d'IA. Ces études permettent aussi de faire le lien avec l'humain puisque de nombreuses correspondances peuvent être réalisées entre le fonctionnement des structures du cerveau des souris et des humains. La prochaine section s'intéresse alors à l'étude du phénomène de l'IA chez l'humain.

2.5 Extension de résultat des souris sur l'humain

La transposition des résultats de l'IA de la souris à l'être humain est un réel défi, en particulier parce qu'elle implique la mesure de régions profondes du cerveau et peut dépasser les limites éthiques. En effet, pour accéder à ces régions chez la souris, des études antérieures ont employé diverses méthodes, telles que des mesures électrophysiologiques directes (Varela et *al.*, 2012), ou la microdialyse in vivo (Grahn et *al.*, 1999). En effet, l'identification des circuits de la détection de la contrôlabilité par Maier et Seligman implique l'injection de traceurs permettant après la dissection de la souris de suivre le parcours exact des différents neurotransmetteurs identifiés. Toutefois, ces méthodes sont évidemment inenvisageables chez l'humain. C'est ainsi que l'IRM fonctionnelle (IRMf) est souvent utilisée pour mieux comprendre ce phénomène chez l'être humain (Blythe et *al.*, 2022; Wade-Bohleber et *al.*, 2021). Parallèlement à la mesure de ces régions profondes, provoquer le phénomène d'IA est aussi un défi éthique. En outre, divers éléments nocifs et dérangeants peuvent être utilisés pour induire un stress incontrôlable chez les humains, tels que des bruits forts (Bollini et *al.*, 2004; Henderson et *al.*, 2012; Meine et *al.*, 2020), des chocs électriques (Havranek et *al.*, 2016) une stimulation thermique (Bräscher et *al.*, 2016), ou des tâches insolubles (Bauer et *al.*, 2003). Pour mesurer l'impact de l'IA sur des individus la résolution d'anagramme s'est révélée efficace pour juger son effet entre plusieurs individus (Cemalcilar et *al.*, 2003; Taylor et *al.*, 2014) et ne pose pas de problème éthique dans ce cas. En effet, l'IA générée chez les participants cause la réduction de leur performance et leur score s'en retrouve amoindri. En ce qui concerne les menaces physiques telles que les nuisances sonores incontrôlables, une étude récente montre que les participants soumis à l'IA sont plus épuisés et moins performants dans

les essais ultérieurs où la menace physique peut être évitée (Meine et *al*., 2020) ce qui montre encore une fois que les humains ont aussi les symptômes néfastes de ce phénomène.

Dans cette étude, il a été reproduit une expérience qui est initialement réalisée dans une salle de classe par le docteur Charisse Nixon à ses étudiants[3]. Dans cette expérience, il est donné aux étudiants d'une classe à chacun une anagramme qu'il leur est demandée de résoudre, puis de lever la main lorsque la réponse a été trouvée. Cependant, la moitié de la salle a une anagramme n'ayant pas de solution tandis que l'autre moitié a une anagramme solvable. L'expérience est répétée de la même façon une deuxième fois. Puis, la troisième étape consiste à donner la même anagramme à tout le monde. Cette expérience de classe montre des résultats stupéfiants (Paul, 2020). En effet, la partie de la classe qui a eu à résoudre deux anagrammes impossibles voit leur résultat bien inférieur à l'autre groupe pour la dernière anagramme. De plus, les étudiants de ce même groupe semblent présenter les caractéristiques connues de l'IA, c'est-à-dire la passivité et l'abandon. En addition, la comparaison sociale à un impact fort dans l'IA (Fincham et Hokoda, 1987) et agit dans cette expérience en classe comme un élément l'accentuant. Dans cette expérience en classe, la troisième anagramme donnée qui est la même dans les deux groupes est beaucoup moins bien réussie dans le groupe comprenant les anagrammes impossibles. Ainsi, les élèves dans le groupe soumis à l'impuissance ont, en quelque sorte, appris à ne pas réussir. D'une part, si le DRN agit de la même façon pour les souris et les humains et si une anagramme impossible à le même effet sur le DRN qu'un choc incontrôlable alors le DRN pourrait être continuellement activé à la suite des anagrammes impossibles et implique ainsi chez certains sujets la passivité. Il est possible que la contrôlabilité ne soit pas détectée par les régions en amont du DRN, qu'aucune inhibition ne soit effective et que son activation demeure stable. Ainsi, il est important de noter que provoquer l'IA et la mesurer est un réel défi. Le choix des technologies utilisées pour mesurer l'IA est ainsi justifié dans les prochaines sections.

[3] https://www.youtube.com/watch?v=gFmFOmprTt0&t=106s

2.6 Mesures en IRMf, signal BOLD, réponse galvanique, test OCEAN

2.6.1 Mesures en IRMf et signal BOLD

Ce paragraphe n'a pas pour but de réaliser un cours sur la physique de l'IRM mais permet de comprendre le choix de la technique IRM pour obtenir une partie des données. L'imagerie par résonance magnétique se base sur les principes physiques de la magnétisation d'un atome d'hydrogène dû à son spin et donc à son moment magnétique. En effet, le moment magnétique induit par le spin de l'atome d'hydrogène s'aligne en un mouvement de précession parallèlement au ligne du champ $\overrightarrow{B0}$ comme indiquée dans la Figure 2.6. La fréquence de ce mouvement de précession est proportionnelle à la force du champ $\overrightarrow{B0}$ et est appelée la fréquence de Larmor. La magnétisation longitudinale des atomes d'hydrogènes dans le sens de $\overrightarrow{B0}$ (résultant d'un excès de proton de moment magnétique dans le sens de $\overrightarrow{B0}$) n'est pas mesurable car elle est trop faible par rapport à celui-ci. Des ondes radio (RF) de même fréquence que le mouvement de précession des protons sont émises et viennent les faire rentrer en résonance afin de les orienter en phase dans le plan orthogonal à $\overrightarrow{B0}$, c'est l'excitation. Enfin, lorsque ces atomes d'hydrogènes se réorientent vers le champ $\overrightarrow{B0}$, ils se réorientent avec ce même mouvement de précession à une fréquence proportionnelle à l'intensité $\| \overrightarrow{B0} \|$, c'est la relaxation. Il y a alors deux types de relaxation, la relaxation longitudinale dans le sens de $\overrightarrow{B0}$ appelé T1 et la relaxation dû à la perte de cohérence de phase dans le plan transversal, c'est la relaxation T2. Ces deux relaxations se produisent de façon exponentielle avec des constantes de temps différentes T1 et T2. Ainsi, en ayant induit un gradient de champ magnétique supplémentaire, il est possible de connaître la localisation des amas d'atomes d'hydrogènes. Enfin, les tissus sont différenciables car ayant des propriétés de relaxations différentes dû à leur composition en atomes magnétisés. La Figure 2.6 représente à gauche l'alignement des protons dans le champ $\overrightarrow{B0}$ désigné par la flèche rouge, au milieu le désalignement

de ces protons puis à droite leur retour progressif vers un alignement avec le champ $\overrightarrow{B0}$ en suivant un mouvement de précession désigné par le tracé continue noir.

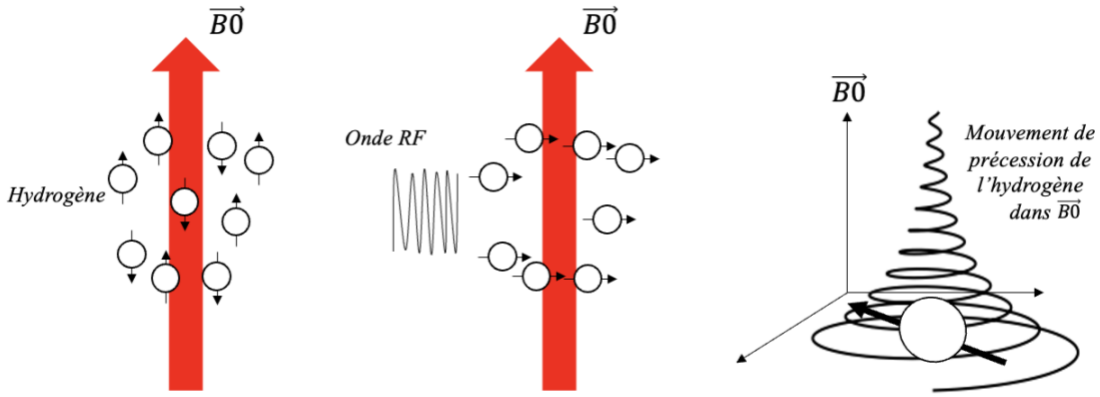

Figure 2.6. Représentation du phénomène physique mesuré en IRMf. À gauche les atomes d'hydrogènes aligné avec le champ principal $\overrightarrow{B0}$ indiqué par une flèche rouge. Au milieu les atomes d'hydrogènes en phase par l'excitation de l'onde RF. À droite un atome d'hydrogène revenant à sa position stable en suivant un mouvement de précession. Les longueurs d'ondes illustrées dans la figure du milieu n'ont pas pour but d'indiquer un ordre d'échelle.

Le signal dépendant du niveau d'oxygène dans le sang (Blood-Oxygen-Level Dependent : BOLD en anglais) est quant à lui issu de l'augmentation du flux d'hémoglobine oxygénée qui est diamagnétique et d'une augmentation d'hémoglobine désoxygénée qui est paramagnétique dans les régions où l'activité neuronale augmente. En effet, l'hémoglobine est une protéine comportant plusieurs atomes de fer qui lorsqu'ils perdent leur liaison avec l'atome d'oxygène se réduisent et se retrouvent à l'état d'ions ferreux comportant deux électrons non appariés. Alors, la molécule est de nature paramagnétique. De plus, cet apport d'hémoglobine oxygénée est excessif par rapport à la consommation qui en est faite par les neurones et donc l'hémoglobine oxygénée augmente localement augmentant localement l'intensité du signal magnétique.

Finalement, le choix de la mesure en IRMf est donc justifié par le fait qu'une telle mesure permet de détecter des changements dans l'activité neuronale dans des zones profondes (DRN) du cerveau. Au contraire, l'électroencéphalographie (EEG) ne permet pas une mesure de l'activité neuronale profonde. D'autres mesures de signaux physiologiques peuvent être utilisées pour caractériser avec

plus de précision le phénomène de l'IA. Il est notamment possible de penser à la mesure du signal électrodermal qui est une mesure fiable de l'intensité émotionnelle vécue par le participant. Le choix de cette mesure est abordé dans la section suivante.

2.6.2 Système nerveux autonome sympathique : choix de la mesure de la réponse galvanique

Le système nerveux autonome permet la régulation automatique de nombreux phénomènes physiologiques. Il comprend le système sympathique et le système parasympathique. Alors que le système parasympathique régule le corps à l'apaisement, le système sympathique sert à son activation. Le système sympathique prépare le corps à réagir (fuite ou combat) face à des situations stressantes. Il a un impact sur des processus internes tels que l'accélération du battement du cœur, la dilatation de la pupille ou encore la sudation de la peau. De façon plus générale, le système sympathique va influencer l'activité électro-dermique (Electro Dermal Activity : EDA en anglais) de la peau. Il est possible de mesurer à l'aide d'un capteur la conductance[4] de la peau. En effet, lorsqu'un stimulus émotionnel a lieu (positif ou négatif) la conductance de la peau est modifiée. De plus, cette conductance est la conséquence d'une réponse galvanique qui est inconsciente et ne peut donc pas être contrôlée par le participant. Ainsi, cette mesure est un indicateur fiable de la réponse émotionnelle du participant lors de l'épreuve. De plus, cette mesure peut être révélatrice de la passivité d'un individu qui aura une réponse émotionnelle plus faible s'il devient indifférent au test qui lui est présenté ou au contraire plus haute si l'intensité émotionnelle générée par les épreuves est plus intense. Ainsi, le choix de la mesure de la réponse émotionnelle s'est porté sur la mesure de la conductance de la peau d'une part pour simplifier le nombre de mesure réalisée et d'autre part puisque l'unité de neuroimagerie fonctionnelle possédait l'équipement dédié pour cette mesure. En effet, il aurait été possible de réaliser la mesure de la dilatation de la pupille ou des variations du rythmes cardiaque mais le temps prévu pour cette recherche ne permettait pas d'inclure l'analyse de ces signaux.

[4] La conductance augmente lorsque la sudation augmente et celle-ci augmente de façon incontrôlée lors de stimulus émotionnellement forts.

Par ailleurs, il est aussi possible de réaliser des mesures « psychologiques » de la personnalité pour les mettre en perspective avec l'IA. La section suivante s'intéresse alors à l'élaboration dans la recherche scientifique d'un test fiable afin de pouvoir mesurer la personnalité des individus.

2.6.3 Questionnaire de personnalité OCEAN (ouverture d'esprit, consciosité, extraversion, agréabilité, névrotisme)

La description de la personnalité s'est développée en utilisant diverses perspectives théoriques et des niveaux d'abstraction variés. Par exemple, en 1929, McDougall a avancé cinq domaines pour définir la personnalité, à savoir l'intelligence, les tendances conatives[5], le mode d'exploitation des tendances conatives, l'action du corps sur les réactions psychologiques et physiques du système nerveux, et l'organisation des tendances affectives en sentiments et complexes (McDougall, 1932). Ces différentes approches ont toutes contribué à la compréhension des différences individuelles en matière de personnalité. Les chercheurs ont adopté le concept de traits de personnalité comme unité de mesure des différences individuelles, et il y a eu un consensus croissant autour des "Cinq Grands" facteurs de personnalité, connus sous le nom d'ouverture, de conscienciosité, d'extraversion, d'agréabilité et de névrotisme. Des études lexicales ont renforcé l'idée que les attributs importants de la personnalité d'une culture donnée sont encodés dans le langage sous forme d'adjectifs. Dans ce contexte, des travaux lexicaux initiaux (Allport et Odbert, 1936) ont contribué à l'émergence du modèle en cinq facteurs « five-factor model » (FFM) ou OCEAN ou encore « Big five Inventory » (BFI) identifiant de nombreuses caractéristiques de la personnalité (Plaisant et *al.*, 2010). Cependant, la classification de ces caractéristiques en catégories distinctes a suscité des débats, car les frontières entre ces catégories se sont avérées floues, remettant en question leur caractère arbitraire (Allen et Potkay, 1981).

Finalement, John, Donahue et Kentle (1991) ont développé le "Big Five Inventory" (BFI) (John et *al.*, 2012), un outil concis visant à mesurer les prototypes des cinq principaux facteurs de la personnalité identifiés par les chercheurs précédents. Ce questionnaire de 44 items a été conçu en utilisant les prototypes établis par des experts et confirmés par des analyses factorielles basées sur

[5] Une tendance conative est la tendance à passer à l'action.

les données recueillies auprès d'observateurs. L'objectif était de créer un formulaire court permettant une mesure efficace des cinq dimensions.

Contrairement à l'utilisation de simples adjectifs, les éléments du BFI sont formulés sous forme de courtes phrases comme ce qui est présenté en **ANNEXE G** avec une forte charge factorielle[6] dans chaque dimension. Ainsi, malgré le fait que ce test ne comporte que huit à dix items par axe de personnalité, il couvre efficacement les domaines de la personnalité et possède l'avantage d'être simple et rapide à réaliser (John et *al.*, 2012). En effet, un participant peut le réaliser aisément en moins de 10 minutes et le support est un questionnaire à choix multiple qui est simple à mettre en place.

Finalement, le questionnaire de personnalité qui sera utilisé et qui a été proposé par John et al. en 2012 est rapide et simple à utiliser et est décrit comme permettant d'avoir des scores de personnalité fiables selon les axes OCEAN. Les résultats des tests OCEAN réalisés par les participants de cette recherche ont été analysés dans la section 4.4.1 afin de vérifier que les groupes étaient équilibrés en termes des personnalités et que les résultats montrent que les personnalités sont correctement disjointes. La prochaine section se portera sur la faisabilité d'observer les régions décrites par Maier et Seligman à l'aide de l'IRMf et conditionnera ainsi les paramètres de mesures utilisés par l'IRM.

2.7 Volume, densité neuronale et localisations des régions observées

La connaissance des tailles et des volumes des zones d'intérêts de cette étude est primordiale afin de correctement dimensionner la séquence d'IRMf dans cette étude et ainsi s'assurer qu'il est possible de mesurer leur activité lors des phases de réflexion et de repos du participant. Les résultats de la recherche bibliographique sur les volumes du DRN et des noyaux caudates sont présentés dans le Tableau 2.2 comprenant les volumes des zones, le nombre de voxels attendus avec une taille de voxel de 2 mm par 2 mm par 2 mm ainsi que de la possibilité d'une mesure en IRMf.

[6] C-à-d qui peuvent être facilement catégorisé entre les cinq personnalités du test OCEAN.

Tableau 2.2 Estimation dans la littérature scientifique des tailles des zones d'intérêts étudiées. Le volume est présenté en mm^3 et est le volume moyen estimé par l'étude de Baker et *al* de 1990 (Baker et *al.*, 1990) dans le cas du DRN, l'écart type donné étant l'écart des sujets étudiés de cette même étude. Le nombre de voxels est estimé en sachant qu'un voxel dans notre étude en IRMf a un volume de 2 mm x 2 mm x 2mm= 8 mm^3.

	Volume (mm^3)	Écart-type du volume (mm^3)	Nombres de voxels attendus en IRMf	Possibilité d'une mesure en IRMf
Dorsale Raphé Nucleus	71,3	4,5	8	Possible mais compliquée
Noyaux caudates	9000	Non déterminé	1125	Oui

Les résultats présentés pour le DRN sont à prendre avec précaution. En effet, les résultats sont tirés de l'étude de (Baker et *al.*, 1990) qui tire ces résultats de seulement 4 individus âgés à leur mort de 42, 49, 67 et 68 ans. Il est possible que la densité de neurone évolue avec l'âge. En effet, l'étude de Koikkalainen et al. montre notamment que la taille du striatum diminue en vieillissant (Koikkalainen et *al.*, 2007). Dans leur article de 2016 Maier et Seligman expliquent qu'il est compliqué d'obtenir des données valides pour le noyau du raphé dorsal. Cependant, il existe depuis 2016 plusieurs études qui ont réussi à obtenir des données fonctionnelles de cette zone du cerveau (Singh et *al.*, 2022) à l'aide d'un scanner basé sur la technologie d'un champ de 3 Tesla. Cette étude de Singh et *al* de 2022 réalise ses mesures à l'aide d'un scanner 7T puis montre que les résultats qu'elle obtient sont aussi réalisables dans un scanner 3T.

En ce qui concerne le striatum dorso médial, il est situé dans la partie caudate du striatum. L'étude de (Raz et *al.*, 2003) montre que la taille du noyau caudate varie entre environ 10 cm^3 à l'âge de 20 ans à environ 9 cm^3 à l'âge de 70 ans. Il faut cependant noter que le DMS représente une petite partie du noyau caudate. Par ailleurs, il existe tout de même une étude réalisant une mesure du signal BOLD du DMS (Patterson et Knowlton, 2018). Ainsi, cette région avec des tailles de voxels

de 2 mm par 2 mm par 2 mm pourrait ne comprendre qu'un voxel. Par conséquent, cette étude s'intéressera plus globalement à la présence de voxel déclaré activé dans une région plus étendue, le striatum caudate.

Il est primordial de pouvoir mesurer l'activation du DRN dans les temps de réflexion et dans les phases de repos. Par conséquent, les paramètres physiques de mesure en IRMf seront contraints par les données obtenues dans cette partie. Par ailleurs, à la suite de la réalisation des tâches est aussi mesurée l'activité cérébrale en état de repos comme ce qui est décrit la section 4.3.1 de l'article afin de revenir à la problématique principale de cette recherche. Il est donc important de comprendre le fonctionnement par défaut du cerveau et plus globalement la façon dont interagissent plusieurs régions avec le réseau de fonctionnement par défaut, de l'anglais « Default Mode Network » (DMN). La prochaine section s'intéresse alors au DMN et la perception du soi en état de repos.

2.8 Réseaux neuronaux et le cas du réseau de fonctionnement par défaut

2.8.1 Identification d'un réseau

Un réseau est identifié lorsque, lors d'un processus cognitif, des zones sont fortement corrélées entre elles. C'est-à-dire que leur signal BOLD est fortement temporellement corrélé. Afin, d'identifier les nœuds du réseau, sont sélectionnés des zones « graines » d'études ce qui signifie que le signal est spatialement moyenné au cours du temps dans cette région. Par la suite, il est calculé la corrélation entre ce signal temporel moyen issu de la région « graine » et de tous les autres voxels du cerveau donnant ainsi une carte des corrélations. Les régions présentant de fortes corrélations temporelles entre elles, sont alors désignés comme sous-région d'un réseau neuronal.

2.8.2 Le default mode network (DMN) et la perception du soi en état de repos

Par définition, un réseau neuronal est identifié lorsque plusieurs régions du cerveau ont un signal BOLD significativement corrélé dans le temps. Initialement, le réseau de fonctionnement par défaut ou DMN a été découvert comme étant l'ensemble des zones se désactivant lors d'une tâche cognitive (Shulman et *al.*, 1997). Ce réseau neuronal est celui qui reçoit une attention particulière puisque des dysfonctionnements dans celui-ci ont été identifiés dans de nombreux troubles psychologiques tels que les troubles de l'attention et de l'hyperactivité, le trouble obsessionnel-

compulsif, le trouble de stress post-traumatique et la schizophrénie (Sha et *al.*, 2019). C'est-à-dire que l'analyse de la connectivité du DMN a montré des différences notables entre un groupe de contrôle en bonne santé et un groupe ayant l'une des maladies citées. De nombreux travaux étudient le DMN en demandant aux sujets de ne penser à rien en particulier lors de la session d'IRMf, séquence qui est alors nommée « resting-state » IRMf (rs-IRMf). Ce protocole était à l'origine pensé pour mettre en action ce réseau puisque considéré comme étant la distinction entre le fonctionnement du cerveau dans une période de tâche contre une période de repos (Raichle et *al.*, 2001). Finalement, il a été montré que cet état ne disparaît pas lorsque aucune tâche active n'est demandée au participant mais quand le sujet fait preuve d'une pensée centrée sur soi (Molnar-Szakacs et Uddin, 2013) ou/et provoquant des émotions fortes (Gusnard et *al.*, 2001; Satpute & Lindquist, 2019). En effet, bien que le participant ne soit soumis à aucune tâche spécifique, il est possible que le sujet pense à lui à ce moment. Entre 2001 et aujourd'hui beaucoup d'autres processus cognitifs ont été identifié comme activant le DMN. En effet, ce réseau est notamment activé par la mémoire et la résurgence de souvenir autobiographique passé (Yang et *al.*, 2013), par la résolution mentale de problème future (Gerlach et *al.*, 2011; Pearson, 2019), par des jugements moraux (Marín-Morales et *al.*, 2022) et beaucoup d'autres problèmes cognitifs où la projection du soi est induite. Ces différents processus cognitifs apparaissent idéalement lorsque le sujet laisse son esprit vagabonder et donc notamment lors d'une phase de repos. Dans le cadre de cette étude, il est ainsi probable d'observer plus d'activation du DMN dans le groupe de test que dans le groupe de contrôle lors de la phase de repos puisqu'ayant subi plus d'échecs lors des tâches d'anagrammes que dans le groupe de contrôle. En effet, celles-ci peuvent impacter directement l'idée qu'ils se font de leur propre aptitude à résoudre des anagrammes et plus largement à la perception qu'ils ont d'eux même. Le DMN est aussi particulièrement impliqué lors d'une prise de décision (V. Smith et *al.*, 2021) et lorsque des règles apprises doivent être effectué de façon automatique (Vatansever et *al.*, 2017). Ainsi, il est facile de constater que l'étude du DMN est particulièrement importante dans le domaine de l'amélioration continue des ressources humaines. Encore aujourd'hui, beaucoup de poste de travail demande d'effectuer des tâches répétées et de suivre des principes d'entreprises volontairement prescrites ou non par ses acteurs. Il est donc intéressant de comprendre comment l'IA affecte à court, moyen voir long terme le DMN.

En ce qui concerne sa localisation, le DMN est constitué de plusieurs nœuds principaux comprenant le cortex postérieur cingulate (PCC), le cortex préfrontal médiale (mPFC), le gyrus angulaire (AG),

le cortex préfrontal dorsolatéral (dlPFC), le gyrus préfrontal inférieur (IFG) et d'autres régions plus petites. La Figure 2.7 représente les cartes de probabilité de plusieurs régions du DMN superposées sur le MNI-152. Ces cartes permettent de comprendre où sont localisés plusieurs régions du DMN tels que le PCC en jaune, le mPFC en bleu, l'AG en rouge, et l'IFG en rose.

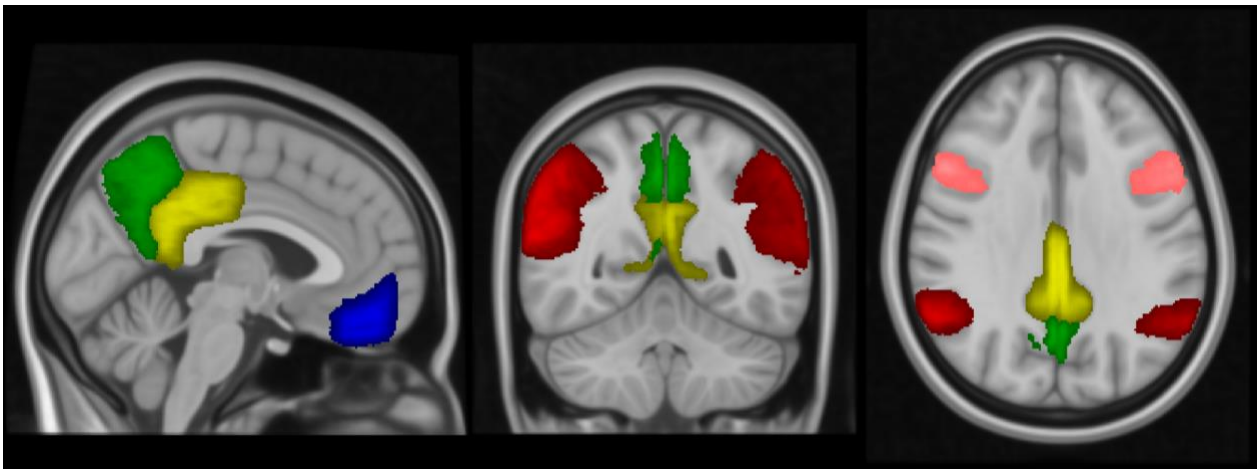

Figure 2.7. Cartes de probabilité de plusieurs régions du DMN superposées sur le MNI-152. Chaque segmentation est représentée par un gradient de couleurs, allant du plus sombre indiquant une probabilité moindre que le voxel soit situé dans la région désignée, au plus lumineux pour une probabilité plus élevée. Les couleurs respectives sont le jaune pour le PCC, le bleu pour le mPFC, le rouge pour l'AG, et le rose pour l'IFG. Aucune segmentation n'a été déterminée pour le dlPFC, ce qui n'est pas bloquant pour cette étude.

Finalement, cette section montre que le DMN est impliqué dans plusieurs processus cognitifs et est notamment liée à la perception du soi. La section suivante s'intéresse à la façon dont ce réseau peut être altéré et les conséquences de cette altération.

2.8.3 L'impact d'un traumatisme sur les réseaux neuronaux

Des zones cérébrales ont été identifiées comme ayant un rôle dans la perception de contrôle à la fois dans les modèles d'IA de la dépression et des Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) (Amat et *al.*, 2005 ; Hammack et *al.*, 2012). De plus, il a été montré que la connectivité fonctionnelle en état de repos du cortex cingulaire antérieure (CCA) est différente entre des militaires pour certains souffrant de stress post-traumatique et des civiles en bonne santé (Kennis et *al.*, 2016). Par ailleurs, il a été montré que l'état initial du cerveau avant le traumatisme peut

affecter la vulnérabilité d'une personne à développer des symptômes persistant de stress post-traumatique. En effet, le volume de l'hippocampe est plus petit chez les militaires ayant un TSPT persistant à la suite d'un traumatisme comparés à ceux qui ne développe pas ces symptômes (Van Rooij et *al.*, 2015). Ainsi, ces précédentes études montrent qu'un traumatisme affecte durablement le fonctionnement du cerveau et cela même en phase de repos. De plus, un individu peut avoir certaines prédispositions impliquant une probabilité plus grande de développer les symptômes de TSPT à la suite d'un traumatisme. En ce qui concerne l'IA, il est intéressant de s'intéresser à ses effets post expérience d'IA chez les individus qui en subissent l'expérience afin de comprendre si comme un traumatisme elle affecte le fonctionnement de cerveau en RS et s'il existe des caractéristiques individuelles induisant de l'IA plus forte et avec plus grande chance. Il est alors pertinent de s'intéresser dans cette étude aux résultats du test OCEAN et de les mettre en perspective avec les effets de l'IA sur les participants.

Cette recherche bibliographique a permis de mettre en évidence l'importance et l'impact néfaste de l'IA dans les organisations ainsi que les points clé de sa compréhension actuelle tels que la localisation des zones du cerveau en jeu, les outils pour la mesurer et les similitudes qu'il pourrait y avoir entre l'effet d'un traumatisme et l'effet de l'IA sur le cerveau. La compréhension du phénomène de l'IA et la méthodologie de recherche la concernant permet de mettre en place les piliers de notre étude, c'est-à-dire ses objectifs, ses hypothèses et ses modèles. Le CHAPITRE 3 s'intéresse alors à l'élaboration des objectifs et hypothèses liés à cette recherche mais s'intéresse aussi aux contraintes à prendre en compte pour l'élaboration du protocole expérimental.

CHAPITRE 3 FORMULATION DU PROBLÈME ET CONSTRUCTION DU PROTOCOLE

3.1 Objectif principal

Cette étude cherche à évaluer l'impact de l'IA sous la perspective de l'IRMf, du test de personnalité OCEAN, des variables sous-jacentes à la résolution des anagrammes, du signal électrodermal et du rs-fMRI. L'objectif principal de cette étude est de mesurer les impacts d'une situation devant induire de l'impuissance apprise aux activations cérébrales de manière différenciée à des individus qui ne seraient pas soumis à une telle situation d'impuissance.

3.2 Objectifs secondaires

Objectif secondaire 1 : construire un protocole expérimental validé par un comité d'éthique induisant de l'IA dans un IRM. Ainsi, l'IA doit être induite chez les sujets du groupe soumis à l'IA. C'est-à-dire que le groupe soumis à l'IA réussira moins les anagrammes (voir le protocole 4.3.1) possibles que le groupe de contrôle. **L'hypothèse nulle est que la proportion des mêmes anagrammes résolues est la même**.

Objectif secondaire 2 : mettre en place à l'aide d'ERP libre[7] un test en ligne évaluant la rapidité de résolution d'une base d'anagramme sur un échantillon de participants.

Objectif secondaire 3 : mettre en place un questionnaire en ligne basé sur les questions du test de personnalité OCEAN à l'aide d'ERP libre.

[7] ERP libre (Entreprise Ressource Planner) est un logiciel libre qui permet la gestion d'entreprise. Il permet aussi de monter facilement, à l'aide de son interface graphique, des petits sites internet pour remplir les besoins des utilisateurs.

Objectif secondaire 4 : l'étude de Grahn et *al*. de 1999 montre que le DRN s'active puis se désactive respectivement lorsque la souris est soumise au stimulus stressant puis détecte la contrôlabilité de la situation, c'est-à-dire lorsqu'elle détermine un chemin pour résoudre le problème qui lui est soumis. Il est attendu d'obtenir un résultat similaire chez les participants. Autrement dit, le signal temporel des voxels du DRN doit être corrélé à l'évènement « phase de réflexion » (c'est-à-dire lorsque que le participant réfléchi pour résoudre l'anagramme). Le participant manifeste sa réponse par une pression sur la boîte de réponse (une pression signifiant qu'une réponse a été trouvée). **L'hypothèse nulle est dans ce cas la non-corrélation entre le signal temporel des voxels du DRN avec l'évènement « phase de réflexion »**. La Figure 3.1 ci-dessous illustre une corrélation forte entre deux signaux temporels et détaille les principes du modèle général linéaire (GLM).

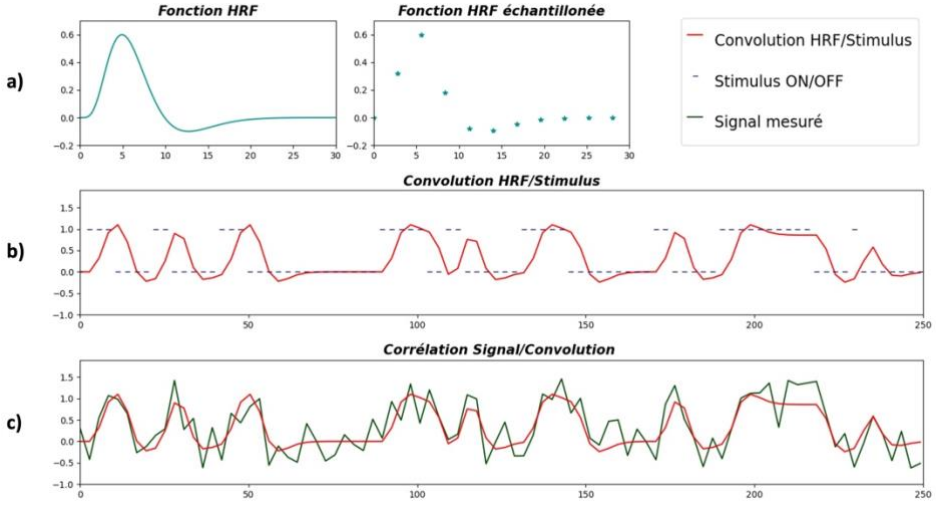

Figure 3.1. Illustration des étapes du modèle général linéaire (c'est-à-dire, afin d'effectuer la corrélation entre le signal temporel mesuré et l'évènement convoluté avec la fonction de la réponse hémodynamique). **a)** Fonction de la réponse hémodynamique (HRF) avec un retard de 6s à gauche, HRF avec les mêmes paramètres échantillonnés. **b)** Évènement booléen quelconque (stimulus ON/OFF) en tiret bleu et résultat de la convolution entre ce même évènement et la HRF en trait rouge continue. **c)** Exemple d'un signal temporel comportant du bruit (en vert) coïncident visuellement avec la fonction étant résultat de la convolution obtenu dans l'étape précédente (en rouge).

Objectif secondaire 5 : le signal électrodermal est une composante physiologique révélatrice du niveau d'intensité émotionnelle vécu chez le participant. Il est attendu que le groupe soumis à l'IA voit son niveau d'intensité émotionnelle supérieure au groupe de contrôle non-soumis à l'IA à travers plusieurs variables sous-jacente au signal électrodermal (nombre de maximums). **L'hypothèse nulle est l'égalité du nombre de maximum dans le signal électrodermal entre le groupe soumis à l'IA et le groupe de contrôle.**

Objectif secondaire 6 : explorer les différences de connectivité en état de repos entre le groupe soumis à l'IA et le groupe de contrôle. Cette partie de la recherche est de nature exploratoire car il n'a jamais été montré à notre connaissance que l'IA induite par une expérience simple (c'est-à-dire la résolution d'anagrammes insolubles) peut entraîner des altérations de la connectivité fonctionnelle post-expérience.

3.3 Contraintes influençant la méthodologie

3.3.1 Nombre de participants, planification et budgétisation

Le projet a été financé par la subvention à la découverte du CRSNG numéro RGPIN-2017-05632 capé à 21k$. Le budget initial alloué à cette recherche a été dimensionné pour une valeur de 5500 $CAD influençant le nombre de sujets et l'ouverture de l'appareillage. Il est à noter qu'il avait été prévu que le protocole dépasse le temps estimé pour les premiers scans (installation et préparation du matériel, entretien etc.) tout en demeurant dans les limites allouées par la subvention. Ainsi, des créneaux d'une heure étaient réservés pour les premiers entretiens afin de calibrer correctement le temps alloué à chaque étape du protocole. Ce temps a pu être réévalué lorsque les transitions entre les étapes du protocole étaient fluides. Ainsi, le temps total de réservation a été réévalué à 45 minutes. Comme évoqué, ce protocole a originellement été construit sous la contrainte budgétaire. Deux variables peuvent être ajustées afin de respecter cette contrainte, le temps alloué aux séances et le nombre de participants. Ainsi, il a été choisi de diminuer le nombre de tâches par individu plutôt que le nombre de participants afin de respecter ce budget. En effet, plusieurs raisons peuvent justifier ce choix. D'une part, puisque choisir d'augmenter le temps des séances peut affecter la qualité de l'implication des participants dans la résolution des anagrammes. En effet, il a été montré à plusieurs reprises que des tâches demandant beaucoup d'effort mentale (résolution d'anagramme), effectué lors de longues sessions, entraînent une fatigue cognitive et ainsi

l'appauvrissement de la qualité de l'implication du participant au cours de temps (Mangin et *al.*, 2023). D'autres part, il est important de souligner que la communication entre le participant et l'expérimentateur est impossible lorsque l'IRM est en acquisition d'images dû au bruit généré par l'appareil. Par ailleurs, il est important de vérifier les réponses des participants. Cette vérification ne peut s'effectuer que par orale puisque la boîte de réponse ne permet pas de transmettre simplement la solution d'une anagramme. Ainsi, les réponses déterminées par le participant ne peuvent être transmises que par orales et qu'après la séquence d'IRMf effectuée. De plus, il est illusoire de penser qu'un participant puisse retenir les solutions de dizaines d'anagrammes effectuées. En effet, il a déjà été montré que la mémoire à court terme d'un humain connaissait de nombreuses limites (Baddeley et *al.*, 1975; Klapp, 1987). Il a été choisi de garder le format précédemment élaboré dans l'expérience en classe de Charisse Nixon avec trois anagrammes (Paul, 2020). Par conséquent, le temps accordé à une séance détermine le nombre de blocs de trois anagrammes qu'il est possible de réaliser. Par ailleurs, il a été convenu de rajouter l'acquisition d'une séquence avec les mêmes caractéristiques que la séquence fonctionnelle mais dans la direction d'acquisition inverse postérieur antérieur (PA) (décrite 4.3.1), ainsi qu'une mesure du champ B0. Ces mesures permettent la correction de certains des artefacts des images fonctionnelles. Finalement, les contraintes budgétaires et de temps impliquaient dans un premier temps qu'une séance pour un participant ne devait pas dépasser 45 minutes. La construction détaillée du protocole est décrite dans la Figure 3.2 ci-dessous. Il y est fait mention de 5 séquences comportant chacune 3 anagrammes et une phase où est mesuré le RS.

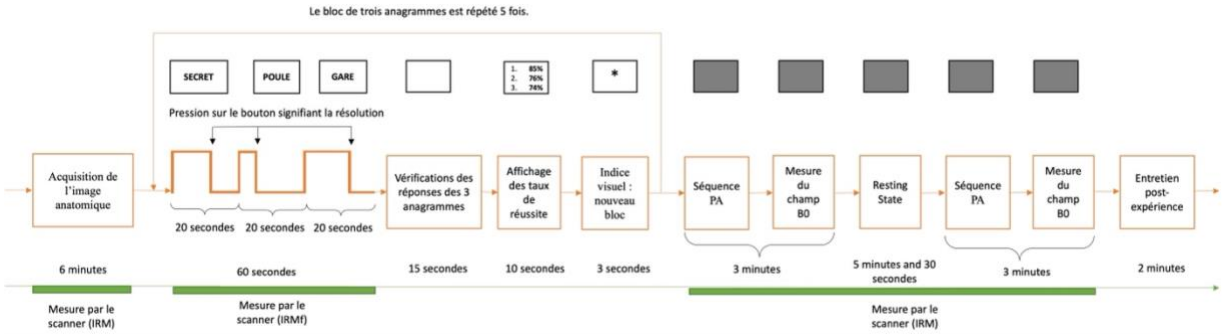

Figure 3.2. Chronologie du protocole expérimental soumis au comité d'éthique. L'entretien préliminaire ainsi que le test OCEAN ont été effectué la veille de la séance. La session commençait par la prise de l'image anatomique et terminait par l'entretien post-expérience. Une séance

complète après la mise en place d'habitudes durait 45 minutes. Le temps total additionné des sous éléments de la chronologie est d'environ 25 minutes. Ainsi, le temps de préparation et les transitions entre ces sous éléments durent environ 20 minutes.

La phase de test dure 12 minutes et 50 secondes et comporte 15 anagrammes à résoudre pour chacun des 7 participants du groupe de contrôle et des 7 participants du groupe de test. Du temps, non-inclus dans le temps de réservation, avant le démarrage de la réservation a pu être alloué pour réeffectuer un entretien préliminaire afin de rappeler les tenants et les aboutissants de la participation du candidat (dans la mesure de la non-divulgation de l'impossibilité de résoudre certaines anagrammes).

3.3.2 Sélection des anagrammes présentés

La sélection préalable des anagrammes présentées est essentielle afin de contrôler le taux d'échec du groupe de contrôle et du groupe soumis à l'impuissance. En effet, des anagrammes trop difficiles impliquent que les participants du groupe de contrôle aient un taux de réussite faible et donc peu différenciable du groupe de test. D'autre part, la sélection d'anagrammes trop simples implique que le groupe de test trouve avec un grand taux de réussite les anagrammes solubles présentées. Par conséquent, un test préalable en ligne a été présenté à treize volontaires (13 participants, 9 hommes, 4 femmes, âge = 23,8 $\pm$ 4,2 ans ($\sigma = 2{,}1\ ans$), différent du groupe participant aux séances d'IRM) afin d'évaluer les niveaux de réussites de différentes anagrammes ainsi que leur rapidité à être résolu. Il est important de noter que ces participants ont été ou le sont encore (11 étudiants en Maîtrise, 1 étudiant au Baccalauréat et une personne ayant terminé ses études) étudiants universitaires au moment de leur participation. Il est ainsi possible que les valeurs déterminées dans le Tableau 3.1 soient plus élevées que les valeurs qui seraient obtenues dans un échantillon plus large de la population. En effet, il a déjà été montré que l'âge était négativement corrélé avec la performance à des tâches de recherche de mots (Gordon et Kindred, 2011). Une liste de trente anagrammes a été présentée dans laquelle quinze anagrammes ont ensuite été sélectionnées dont cinq qui ont été sélectionnée pour être similaire au groupe de test et au groupe de contrôle. Est-présenté ci-après dans le Tableau 3.1 les différentes anagrammes présentées aux participants. A été choisi arbitrairement d'évaluer la difficulté d'une anagramme à l'aide de leur temps de résolution moyen par les participants et de leur taux de réponse positive.

Tableau 3.1. Anagrammes solubles présentées en ligne. L'anagramme « NICHE » n'a pas été sélectionnée car il a été présenté comme exemple aux participants la veille de chaque rencontre pour définir ce qu'est une anagramme. Les anagrammes sélectionnées pour l'étude sont les quinze premières anagrammes (« NICHE » étant exclu) ayant le taux de réussite le plus élevé. D'autre part, les anagrammes « EMPRUNTE », « MIGRAINE » ont été sélectionnées comme des anagrammes insolubles n'ayant eu aucune bonne réponse.

Anagrammes	Temps moyen de résolution (s)	Proportion de bonne réponse (%)
DIETE	12.4	100.0%
NICHE	6.4	100.0%
BEAU	9.5	100.0%
OSER	15.4	91.7%
MAIS	15.6	91.7%
DEMON	6.9	91.7%
POULE	7.0	91.7%
GARE	7.9	83.3%
OPERA	10.2	75.0%
DIGUE	13.6	75.0%
RECENT	14.0	75.0%
SPORE	14.6	66.7%
MARCHE	15.4	66.7%
PURE	8.4	66.7%
DESIR	17.7	58.3%
SECRET	19.6	58.3%
ARBRE	74.3	58.3%
MAGIE	12.3	50.0%
POIRES	16.2	50.0%
EPINE	18.0	50.0%
MERCI	9.8	50.0%
VOYAGE	14.6	41.7%
MANEGE	18.2	41.7%
ENCLISE	18.0	16.7%
SENAT	22.5	16.7%
VANITE	19.0	8.3%
POIGNE	25.0	8.3%
TRAIN	30.0	8.3%
EMPRUNTE	NaN	0.0%
MIGRAINE	NaN	0.0%

Finalement, la liste des anagrammes possibles sélectionnées a été [DIETE, BEAU, OSER, MAIS, DEMON, POULE, GARE, OPERA, DIGUE, RECENT, SPORE, MARCHE, PURE, DESIR, SECRET]. Enfin, parmi ces quinze anagrammes solubles, a été sélectionné cinq anagrammes étant compris dans les dix anagrammes les plus faciles. Ainsi, la liste des mêmes anagrammes données au groupe de contrôle et au groupe d'IA a été [« GARE » : Réussite % = 83%, « BEAU » : Réussite

% = 100 %, « RECENT » : Réussite % = 75 %, « MARCHE » : Réussite % = 67%, « DEMON » : Réussite % = 92%]. En effet, il n'aurait pas été judicieux de retenir les cinq plus simples anagrammes communs aux deux groupes. En effet, choisir des anagrammes trop simples impliquent des taux de réussite trop élevés dans les deux groupes ce qui camouflerait le phénomène induit par l'IA. Par ailleurs, la sélection des cinq anagrammes les plus difficiles pour être des anagrammes communes implique un taux de réussite trop faible ce qui camouflerait aussi le phénomène d'IA.

Ces résultats et ces recherches permettent de mettre en place les éléments clé inhérents à cette recherche, c'est-à-dire la construction de la séance réalisée avec le participant, le choix des anagrammes présentées et la construction des sous objectifs permettant de répondre à la problématique générale et aux hypothèses construites à l'aide des précédentes études dans le domaine de l'IA. Le chapitre suivant présente alors l'article ayant découlé de cette recherche incluant sa méthodologie, ses résultats ainsi que leur discussion et les recommandations pour les recherches futures qui pourraient en découler.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: IMPACT OF LEARNED HELPLESSNESS ON COGNITIVE PERFORMANCE AND RESTING-STATE CONNECTIVITY: AN FMRI STUDY

Pierre Lechat[1], Eva Alonso-Ortiz[2,3,4], Jean-Samuel Bassetto[1]

[1] *Laboratoire d'amélioration continue (LABAC) en génie industriel,* Montreal. 2500, chemin de Polytechnique, Montreal, (Quebec) Canada H3T 1J4

[2]*Department of Electrical Engineering, Polytechnique Montreal, Montreal*
[3]*Institute of Biomedical Engineering, Polytechnique Montreal, Montreal*
[4]*CHU Sainte-Justine, Montreal*

Submitted on February 15, 2024 at Human Brain Mapping

4.1 Abstract

Learned helplessness (LH) is the phenomenon of resignation in the face of a problematic situation and is caused by the feeling of lacking control in a situation due to internal or external factors. This means that an individual does not seek to resolve the situation they are confronted with and consciously or unconsciously chooses to be passive. The Dorsal Raphe Nucleus (DRN) core could be at the root of the persistent action of the LH phenomenon and influences regions such as the striatum and amygdala. It is thought that the LH phenomenon could affect self-perception and it has been shown that the default mode network (DMN) is often associated with self-reflection during the resting state (RS) phase. It is therefore possible that LH influences both self-perception and the DMN. Based on previous studies, we investigated how LH affects participants. We used functional MRI (fMRI) to test this hypothesis. Participants were divided into two groups, subjected to solvable (control group), and solvable plus unsolvable (LH group) cognitive tasks. We also measured electrodermal signals, OCEAN (Openness, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism) personality scores, variables related to the anagram resolution, and related these to LH. The study revealed significant differences in the RS contrast between the two groups, with the Posterior Cingulate Cortex (PCC) (an area of the DMN) being more connected to the DRN in the LH group than in the control group, and a portion of the Superior Temporal Gyrus

being more connected to the PCC in the control group than in the LH group. These results suggest that LH may have a direct impact on the DMN and could lead to the start of long-term changes.

4.2 Introduction

Imagine an individual who, despite putting in consistent and dedicated efforts at their job, repeatedly faces unfavorable reviews and remains overlooked for promotions. These setbacks occur despite their qualifications and skills. Over time, this individual could believe that their actions cannot influence their professional situation, and they begin to experience a sense of powerlessness in the face of their circumstances. In this scenario, they may eventually choose to stop seeking improvements or opportunities for career growth, becoming passive in their approach to work-related challenges. This real-life example exemplifies the phenomenon of resignation and passivity often associated with learned helplessness (LH), where individuals perceive a lack of control over their circumstances due to internal or external factors, and as a result, they choose not to take action.

The LH phenomenon was initially discovered in animals when dogs no longer attempted to escape a stressful stimulus after learning that the stressful elements were inescapable (Maier et Seligman, 1976b). This phenomenon is also found in human beings. When an individual is faced with a perceived unattainable or unachievable goal, experiences a sense of powerlessness in the face of the consequences, and this situation becomes recurrent, they are likely to develop a state of LH. The study of LH in mice has shown that certain areas of the brain play a significant and measurable role in the phenomenon of LH. The Dorsal Raphe Nucleus (DRN) plays a clear role in the release of serotonin 5-HT, leading to the alteration of the functioning of areas such as the amygdala or the dorsal-periaqueductal gray (dPAG) (Maier & Seligman, 2016). The dorsomedial periaqueductal gray (dPAG) has been shown to play a role in the fight/flight/freeze system (Graeff et *al.*, 1997) and the extended amygdala system (including the bed nucleus of the stria terminalis/stria terminalis) plays a role in the regulation of fear and anxiety (Graeff et *al.*, 1997). Additionally, it has been demonstrated by Grahn et *al.* (1999) that the DRN is strongly activated during a stressful situation and remains active when the individual is exposed to a situation where no favorable outcome is perceptible. In other words, this region continues to be activated when the individual is in an uncontrollable situation but deactivates when the situation becomes controllable. Moreover,

unlike the freeze phenomenon in the "fight/flight/freeze" system, which is an immediate reaction to a stressful stimulus, LH-induced passivity is generally associated with a slower reaction.

In their 2016 article, Maier et *al*. emphasize that the scientific community tends to believe that the activation of the DRN is both necessary (Will et *al*., 2004) and sufficient (Maier et *al*., 1995) to induce a state of passivity and anxiety in the subject. The necessity of DRN activation is demonstrated by blocking DRN activation, thereby inhibiting passivity and anxiety after an uncontrollable shock (Maier et *al*., 1993). Furthermore, Maier et *al*.'s 1995 article demonstrates that voluntary activation of the DRN using the neurotransmitter GABA induces behaviors in subjects similar to those observed in subjects suffering from LH. Thus, Maier et *al*.'s 2016 article indicates strong evidence of an equivalence between DRN activation and passivity/anxiety following an uncontrollable shock.

Several regions that have been identified as upstream of DRN activation can either inhibit or activate its effects. Notably, there are neural connections between the ventromedial prefrontal cortex (vmPFC) and the DRN that allow for its inhibition (Maier & Seligman, 2016). Additionally, the dorsomedial striatum (DMS) has connections with the vmPFC and acts in conjunction with the DMS to detect controllability. The DMS/vmPFC circuit is activated in escapable shocks but not in inescapable shocks (Amat et *al*., 2014), meaning that it detects controllability in escapable but not inescapable situations. This circuit also involves the substantia nigra (SN) and the mediodorsal thalamus (MD) (Baratta & Maier, 2019).

Translating the results of LH from mice to humans is challenging, especially since it involves measuring deep brain regions and may exceed ethical boundaries. To access these regions in mice, previous studies have employed various methods, such as direct electrophysiological measurements (Varela et *al*., 2012), or in vivo microdialysis (Grahn et *al*., 1999). However, these methods are too invasive for use in humans. In addition, various harmful elements can be used to induce uncontrollable stress in humans, such as loud noises (Bollini et *al*., 2004; Henderson et *al*., 2012; Meine et al., 2020), electric shocks (Havranek et *al*., 2016), thermal stimulation (Bräscher et *al*., 2016), or insolvable tasks (Bauer et *al*., 2003). Regarding physical threats like uncontrollable

noise disturbances, a recent study shows that participants subjected to LH are more exhausted and perform less well in subsequent trials where the physical threat is escapable (Meine et *al*., 2020).

It is important to introduce the default mode network (DMN) and why this network is important in our study. By definition, a neural network is identified when multiple regions of the brain exhibit a significantly correlated "Blood-oxygen-level-dependent imaging" (BOLD) signal over time. Initially, the DMN was discovered as the set of areas deactivating during a cognitive task (Shulman et *al*., 1997). Regarding its localization, the DMN is composed of several key nodes, including the posterior cingulate cortex (PCC), the vmPFC, the angular gyrus (AG), the dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC), the inferior frontal gyrus (IFG), and other smaller areas (Anticevic et *al*., 2012). This neural network has garnered particular attention since dysfunctions within it have been identified in various psychological disorders such as attention deficit hyperactivity disorder, obsessive-compulsive disorder, post-traumatic stress disorder, and schizophrenia (Sha et *al*., 2019). In other words, connectivity analysis of the DMN has revealed notable differences between a healthy control group and a group affected by one of the mentioned disorders.

Numerous studies investigate the DMN by instructing subjects to engage in unfocused thinking during functional magnetic resonance imaging (fMRI) sessions, a sequence known as "resting-state" fMRI (rs-fMRI). Originally conceived to activate this network and distinguish brain functioning during a task from a resting period (Raichle et *al*., 2001), it has been demonstrated that this state persists not only when no specific task is assigned but also when the subject engages in self-centered (Molnar-Szakacs & Uddin, 2013) and/or emotional thoughts (Gusnard et *al*., 2001; Satpute & Lindquist, 2019). Indeed, even in the absence of a specific task, the participant may be reflecting on themselves during these moments.

Between 2011 and today, many other cognitive processes that activate the DMN have been identified, such as the ones mentioned below. This network is notably engaged during memory recall and the resurgence of autobiographical memories (Yang et *al*., 2013), mental simulation of future problem-solving (Gerlach et *al*., 2011; Pearson, 2019), moral judgments (Marín-Morales et *al*., 2022), and various other cognitive tasks involving self-projection. These cognitive processes ideally manifest when the mind is allowed to wander, particularly during a resting state.

This study replicates an experiment initially conducted in a classroom setting by Charisse Nixon (Paul, 2020). In this experiment, each student is given three anagrams to solve, and they are instructed to raise their hand when they find the answer. However, half of the class is given two unsolvable anagrams, while the other half is given only solvable. The third stage involves giving the same anagram to everyone. This classroom experiment reveals remarkable results cited by (Paul, 2020). The portion of the class that had to solve two unsolvable anagrams performs significantly worse than the other group when attempting the solvable anagram. Furthermore, students in this same group appear to exhibit the known characteristics of LH, namely passivity and resignation (e.g., showing signs of not thinking to find a solution, such as staring into space). Thus, it has been postulated that social comparison has a strong impact on LH. If the DRN acts in a similar way in both mice and humans, and if an unsolvable anagram has the same effect on the DRN as an uncontrollable shock, we hypothesized that the DRN may be activated following unsolvable anagrams and, thus, induce passivity in some individuals (less anagrams found, longer time of resolution). Moreover, we hypothesized that the DRN would deactivate when the anagram was found, since controllability was detected. This result should be particularly true in the control group, since many anagrams should be found. Finally, we have made the assumption that the maps resulting from the rs-fMRI analyses will be different between the two groups. It is possible that the DMN is altered following an LH experience, since LH could generate an alteration in self-perception.

To address these hypotheses, we designed an experimental protocol that used fMRI and was created accordingly to induce LH to participants from the LH group and not to the control group. This study explores the activation in the DRN while subjecting participants to solvable and unsolvable cognitive tasks. We also related physiological data such as electrodermal signals and the response to the OCEAN (Openness, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism) scores to consequences of LH. Finally, we explored the differences in rs-fMRI between participants experiencing LH effects and those in the control group.

4.3 Methods

4.3.1 Data Acquisition

The 14 healthy participants (6 females and 8 males, M_{age} = 24 years, SD_{age} = 2 year) were recruited and randomly assigned to a control group (2 females, 5 males, M_{age} = 24 years, range 20-28) or LH group (4 females, 3 males, M_{age} = 24 years, range 22-25). All participants had normal or corrected-to-normal vision, normal hearing, were proficient in written and spoken French, were native French speakers and had no exclusion criteria for an MRI. The study was approved by a local Research Ethics Committee and all participants provided written consent before participating in the study. Derived data and codes for figures, preprocessing and analyses can be found at https://github.com/PierreLechat/article_codes_LH_fmri.git. Prior to the imaging experiment, participants were subject to the OCEAN test (Plaisant et *al*., 2010), i.e., a test that self classifies individuals according to five major personality traits: Openness to experience, Conscientiousness, Extroversion, Agreeableness, and Neuroticism.

Participants were scanned on a 3T scanner (Siemens Prisma-fit, Erlangen, Germany) equipped with a 64-channel phased-array head and neck coil. Two disposable MRI-compatible electrodes (https://www.biopac.com/product/disp-rt-dry-electrode-100pk/) were fixed on the inside of the right foot, approximately 8 cm apart, to measure electrodermal signals in participants using the BIOPAC MP160 measurement equipment and Acknowledge software (https://www.biopac.com/product/mp150-systems-with-ndt/) (the sampling frequency was set 100 Hz). Electrodermal data was preprocessed, and the phasic component was extracted using the default parameter of the module “eda_process” in the package Neurokit2 (Makowski et *al*., 2021) available in python. The imaging protocol consisted of a high-resolution T1-weighted (T1w) anatomical scan acquired using the MP2RAGE sequence (Marques et *al*., 2010) used for tissue segmentation and task-based and rs-fMRI acquisitions. Task-based fMRI was acquired as a series of 5 repetition blocks (with breaks between each block) using 2D multi-slice T2*-weighted (T2*w) echo planar imaging (EPI) acquisition (repetition time (TR) = 2890 ms, echo time (TE) = 23 ms, flip angle = 83.4°, matrix = 96 x 92, resolution = 2.1 mm x 2.1 mm, 40 slices, 2 mm slice thickness, bandwidth (BW) = 2004 Hz/pixel, partial Fourier phase = 6/8, total scan time = 317.9s, number of EPI for each block = 22, anterior-posterior (AP) phase encoding). Three EPI scans with the same

parameters, but the opposite phase-encoding direction (posterior-anterior (PA)) were additionally acquired after the 5 blocks acquisition. Dual-echo gradient-echo fieldmap images were acquired to allow correction of the echo planar imaging distortions (TR = 650 ms, TE1 = 2.97 ms, TE2 = 5.43 ms).

During fMRI data acquisition, participants were asked to solve both solvable and unsolvable anagrams (LH group) or only solvable anagrams (control group).

Participants in the LH group had to complete five sets of three anagrams. Among these three anagrams, two were unsolvable (none in the control group), and only one was solvable (all three are solvable in the control group), which is the same as the third one in the control group. Figure 4.1 shows in (a) the construction of a block comprising the presentation of three anagrams for a duration of 20 seconds, then a white screen during which the participant's anagram answers are requested, followed by the display of the other participants' anagram results and finally the hint to signify passage to the next step. Part (b) of Figure 4.1 shows the acquisition of EPIs during the test, visually displaying the presses on the participant's answer box.

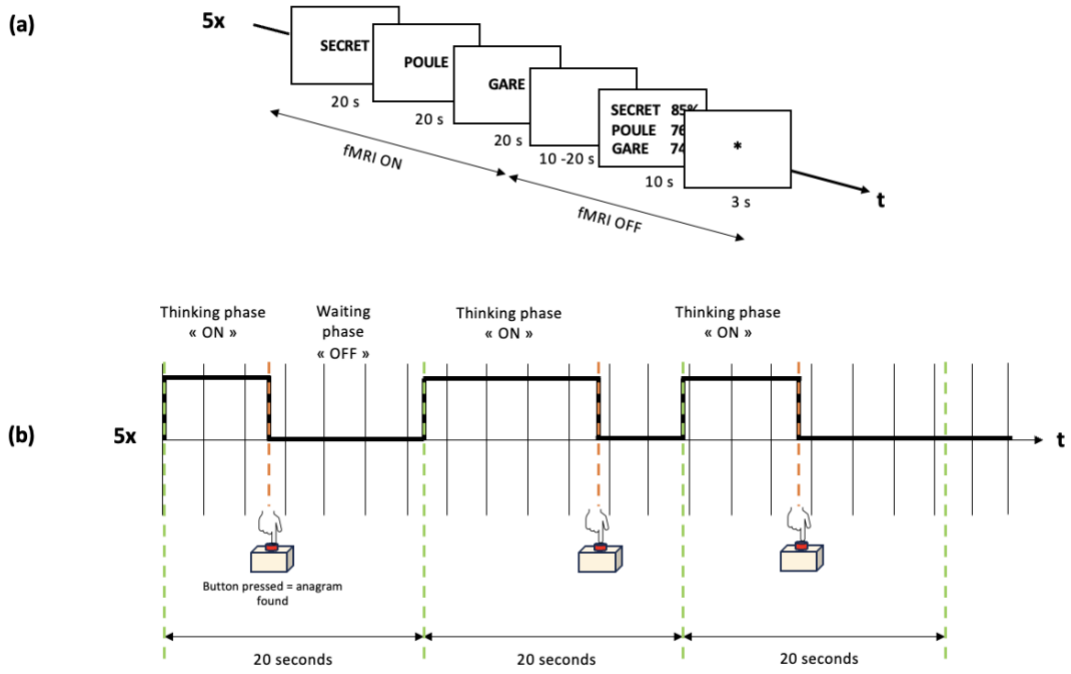

Figure 4.1. **(a)** fMRI scans are acquired during the resolution phase (i.e., during the presentation of the three anagrams, each displayed for 20 seconds). One task-based sequence block comprises 22 EPIs (i.e. 63.6s, to leave a margin of around 4s). Following this, a blank screen is presented, and participants are asked to provide their answers to the anagrams. Subsequently, the scores of other participants are displayed for 10s. Finally, a visual indicator "*" signifies that the sequence will restart in 3 seconds. **(b)** Illustrative example of the sequence in which the participant tried to find the solution to the anagrams. When they found the solution, they were asked to press the button they had. The vertical lines represent the TR times for acquired EPI volumes. The “thinking phase” represents the phase during which the participant tries to find an answer to the anagram and the response time is the duration of the “thinking phase”. The “waiting phase” represents the phase when the participant has already pressed the button, found the answer and is waiting for the 20s to elapse before moving on to the next part of the test. The terminology “resolution phase” will be used to describe one entire block of three anagrams (i.e, “thinking phase” and “waiting phase” combined).

Participants were asked to press a button on a response box once they had found the solution to a presented anagram. Pressing the button did not change the screen, and the participant had to wait 20s before proceeding to the next anagram. This 20-second time period was based on previous studies that examined anagram resolution in fMRI (Aziz-Zadeh et *al*., 2009), as well as the average anagram resolution time of 8 seconds that has been reported (Sinitsyn et *al*., 2020). Following the presentation of three anagrams, a blank screen would appear, and the responses were requested from participants (MRI data acquisition was paused during this period). Answers were given verbally to the experimenter via microphone. Then, a success rate for each of the previous three anagrams was displayed for 10 seconds, meant to reflect the success rate of previous participants. The purpose of the success rate presented after each sequence is to make the subject believe that other participants have already taken the test. In reality, the displayed success rates are fictitious. The goal was to convey to the subject that other participants have been successful in solving anagrams. It is assumed that this information will amplify the LH phenomenon in the LH group subjects (Fincham & Hokoda, 1987). Indeed, the choice of presenting fictitious success rates to the participants may imply that the anagrams have an answer, and thus induce the attribution of failure to internal rather than external causes. Internal, since it is the participants' own "non-competence" that would induce failure at the anagrams. Moreover, it has already been shown that a social defeat can also more likely induce LH (Amat et al., 2010). Here we also verified participants' responses for each anagram sequence since accidental button presses can easily occur. At the end of the 10 seconds time, a small star was shown to indicate that a new anagram would be presented in 3 seconds. This sequence of steps was repeated 5 times.

The rs-fMRI imaging protocol consisted of 2D T2*w EPI scans (TR = 2950 ms, TE = 29 ms, flip angle = 83.7°, matrix = 88 x 88, BW = 1536 Hz/pixel, partial Fourier phase = ⅞, resolution = 2.5 mm x 2.5 mm, 39 slices of 3.5 mm thickness, total scan time = 295 s, AP phase encoding), followed by 3 additional EPI scans with the same parameters but PA phase-encoding. Followed again by a dual-echo gradient-echo field mapping sequence (TR = 650 ms, TE1 = 2.97 ms, TE2 = 5.43 ms). During the rs-fMRI acquisition, participants were presented with a gray screen and instructed to let their minds wander without falling asleep.

After the fMRI and rs-fMRI scanning session, LH participants did not feel "competent" in solving anagrams, which is entirely normal since no answers could be found for some of them. Therefore, participants were told that they had just participated in a LH experiment, and it is normal that they felt frustration during and after attempting to solve the different anagrams. The purpose of this post-experience interview was to defuse any frustration and potential continuation of LH caused by the test they had just undergone. A set of positive phrases and vocabulary were provided to the participants for this purpose, such as: "It is entirely normal that you did not succeed since the anagrams were partly impossible.".

4.3.2 fMRI Data Pre-Processing

MRI data were preprocessed using the FMRIB Software Library (FSL) v6.0, (Jenkinson et *al*., 2012). Steps included head motion correction using the MCFLIRT tool (Jenkinson et al., 2002), non-brain structure removal utilizing BET (S. M. Smith, 2002), susceptibility distortion correction based on AP/PA acquisitions (FSL's topup module (Andersson et *al*., 2003)), correction of B0 distortions using B0 map (FSL's FUGUE module (S. M. Smith et al., 2004)), and spatial smoothing using Gaussian kernel with 8 mm full width at half maximum (FWHM). Then, the fMRI scans were aligned to the subject's high-resolution T1w image (i.e., MP2RAGE) using the boundary-based registration (Jenkinson & Smith, 2001). Finally, the T1-aligned fMRI images were non-linearly co-registered to the MNI152 template image (Andersson & Jenkinson, 2007).

4.3.3 fMRI Statistical Analysis

Task-based analysis

The statistical analysis of the task-based fMRI data was performed using the FMRI Expert Analysis Tool (FEAT) tool (Woolrich et *al*., 2004a), part of FSL, utilizing the general linear model (GLM). At the single-subject (i.e., first) level, EPI voxel time courses were correlated with the canonical Hemodynamic Response Function (HRF) convolved with the experimental event blocks (Figure 1b) resulting in 1 contrast of parameter estimate (COPE) map for each participant in each block for each group (LH and control group). A second level analysis for the control group was carried out using a mixed effect model (FLAME 1, (Woolrich et *al*., 2004b)), part of FSL, with the COPE

image from all subjects from the control group. Z-statistic images were thresholded using clusters determined by z > 1.8 and a corrected cluster significance threshold of $p = 0.01$ was considered as significant. Then, a second-level analysis for the LH group was carried out using a mixed effect model, with the COPE image from the LH group as input. Z-statistic images were thresholded using clusters determined by z > 3.75 and a corrected cluster significance threshold of $p = 0.1$ was considered as significant. A group-level analysis was then carried out to compare the activation of the DRN in the "thinking phase" between the LH and the control group. Z-statistic images were thresholded using clusters determined by z > 2.3 and a corrected cluster significance threshold $p < 0.01$ was considered as significant.

Seed-based analysis for rs-fMRI

For the rs-fMRI data, we used the same preprocessing steps used for fMRI EPI data. We conducted a connectivity-based analysis using FEAT and the PCC, which was previously used as a seed of interest (Vatansever et *al*., 2017; Zhou et *al*., 2020). For this, the signal intensity in the seed of interest was averaged and a whole brain analysis was performed by comparing the intensity in the seed base with all other voxels. Data processing was made according to two levels. At the first level, EPI voxel time-courses were correlated with the average signal in the seed of interest. A second-level analysis at the group level was carried out using a mixed effect model. Z statistic images were thresholded using clusters determined by z > 1.8 and a corrected cluster significance threshold of $p = 0.01$ was considered as significant.

The various regions of interest mentioned in the introduction, such as the DRN, the caudate nucleus, the amygdala, the vmPFC and the PCC, were identified and segmented using the atlases cited below. The DRN region was segmented using the Levinson-Bari Limbic Brainstem Atlas, which includes the dorsal Raphe nucleus mask (Levinson et *al*., 2023). The caudate nucleus of the striatum was segmented using the WFU-Pick atlas (Version 3.3, Wake Forest University, School of Medicine, Winston-Salem, North Carolina; www.ansir.wfubmc.edu). The PCC has been segmented using the "Harvard-Oxford Subcortical Structural Atlas" available in FSL. The vmPFC was segmented using the "Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas" (also available in FSL). These atlases have enabled us to identify the different activated clusters.

4.3.4 Statistical analysis for the other variables

Statistical analysis for variables related to the anagram test such as response time, score, number of instruction errors, OCEAN test variables, and number of peaks in the electrodermal signal was performed using the scipy "stats" module in Python (Virtanen et *al.*, 2020). Instruction errors mean that the participant has not followed one of the rules presented before the session, i.e., pressing the answer box several times for a single anagram, pressing the answer box when no answer has been found, giving an answer in English or forgetting an answer that had been found.

These different methodological points allow us to verify in the following section our different hypotheses such as the relationship between OCEAN test variables and LH, between electrodermal signal and LH, between anagram resolution and LH and the observability of difference between resting state maps between the two groups.

4.4 Results

4.4.1 OCEAN test

The verification of an unbiased group in the OCEAN test is essential to judge the real effect of LH alone. Indeed, unbalanced groups in terms of OCEAN test variables could attenuate or accentuate the results that a balanced sample would allow. We therefore measured the intercorrelations between the OCEAN test variables of all subjects and how they were distributed between the control and LH groups. First, a Shapiro-Wilk test (S) revealed that the OCEAN test variables ($S_{Openness}(12) = 0.95$, $p_{Openness} = 0.53$, $S_{Conscientiousness}(12) = 0.94$, $p_{Conscientiousness} = 0.38$, $S_{Extraversion}(12) = 0.95$, $p_{Extraversion} = 0.56$, $S_{Agreeableness}(12) = 0.94$, $p_{Agreeableness} = 0.36$, $S_{Neuroticism}(14) = 0.93$, $p_{Neuroticism} = 0.27$) and the response time ($S_{RT}(49) = 0.84$, $p_{response\ time} < 2.10^{-5}$) (where "$S_x(y)$ is the statistic, "x" is the OCEAN test variable, and "y" is the degree of freedom) were not significantly normally distributed so we decided to perform a Spearman (non-parametric statistical test) coefficient correlation calculation (r). Several assessment axes of the OCEAN test revealed high significant correlations (Figure 4.2) (Spearman correlation coefficients: $r_{Openness/Agreeableness}(12) = 0.77$, $p_{Openness/Agreeableness} < 0.0015$, $r_{Agreeableness/Extraversion}(12) = 0.78$, $p_{Agreeableness/Extraversion} < 0.001$). Conversely, there appeared to be a medium negative correlation between Extraversion and Neuroticism, and this was found to be statistically significant ($r_{Extraversion/Neuroticism}(12) = -0.55$, $p_{Extraversion/Neuroticism} < 0.05$). Figure 4.2 shows the matrix of intercorrelations between variables in the

OCEAN test, using a colored gradient from bright for high positive correlation to dark for strong negative correlation.

Spearman correlation coefficient matrix of the OCEAN test variables for all subjects

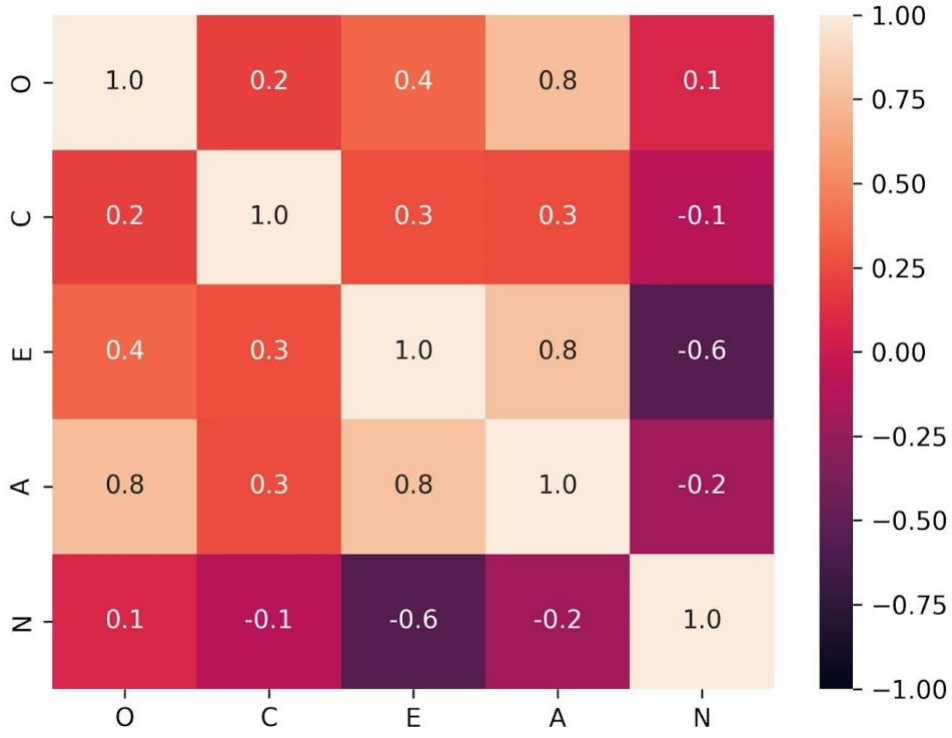

Figure 4.2. Spearman correlation matrix showing the correlation coefficient between the various variables of the OCEAN personality test, including Openness (O), Conscientiousness (C), Extraversion (E), Agreeableness (A), and Neuroticism (N), for all subjects.

The Kolmogorov-Smirnov (ks) test revealed that the control and LH groups were not all significantly well balanced according to OCEAN scores ($ks_{Openness}(12) = 0.43$, $p_{Openness} = 0.58$, $ks_{Conscientiousness}(12) = 0.14$, $p_{Conscientiousness} > 0.99$, $ks_{Extraversion}(12) = 0.29$, $p_{Extraversion} > 0.95$, $ks_{Agreeableness}(12) = 0.43$, $p_{Agreeableness} = 0.58$, $ks_{Neuroticism}(12) = 0.29$, $p_{Neuroticism} > 0.95$). These results will be considered in the analysis of the consequence of LH on the variables relative to the anagram resolution (response time, proportion of correct answers).

4.4.2 Effect of LH on solvable anagram resolution

We measured the differences between the control and LH groups for several variables related to anagram solving (i.e., proportion of correct answers, response time and number of instruction errors). It's important to note that these values are always derived from the same anagrams solved between the two groups.

Concerning anagram resolution scores, the average (μ) anagram resolution scores were found to be: $\mu_{LH} = 3.43$, $SD_{LH} = 1.27$, $\mu_{control\ group} = 3.71$, $SD_{control\ group} = 0.95$, for LH and control groups respectively (SD is the standard deviation). A χ^2 test between the two samples revealed non-significant differences ($\chi^2(12) = 0.28$, $p > 0.58$). Furthermore, the average number of instruction errors per participant was higher in the LH group, although this was found to be nonsignificant while conducting a Mann-Whitney test (U) ($\mu_{control\ group} = 1.86$, $\mu_{LH} = 3.00$, $U(12) = 16.5$, $p = 0.32$). Moreover, these results should be interpreted with caution. More than 10% of the instruction violations in the LH group resulted from the response given to the anagram "GERME," which led to the response "MERGE" in English. This might have been an oversight by the participants who provided this response. The differences in instruction violations between the two groups are less significant when this error is not counted ($\mu_{control\ group} = 1.86$, $\mu_{LH} = 2.43$, $U(12) = 20.5$, $p = 0.65$).

Regarding response time, it was observed that the average supposed response time is significantly greater in the LH group than in the control group ($\mu_{response\ time\text{-}control\ group} = 8.99$ s, $\mu_{response\ time\text{-}LH} = 13.15$, $ks(12) = 0.39$, $p < 0.006$). One might question whether the 20-second thinking time, when no response is given by the participant, artificially increases the difference between the two groups. Therefore, it is interesting to examine the time difference between the two groups when a response is given. It turns out that the average response time for correct answers only is still higher in the group subjected to LH ($\mu_{response\ time\text{-}solution\ found\text{-}control\ group} = 5.17$ s, $\mu_{response\ time\text{-}solution\ found\text{-}LH} = 9.88$ s, $ks(12) = 0.51$, $p < 0.0025$).

Finally, it is also noted that the number of self-deprecating comments is higher in the LH group than in the control group. We recorded some comments and reactions from participants subjected to LH:

- "Response 'DEBILE' given to the anagram 'DECIBEL.'"

- "Laughter during the session since no answers were found."
- Explanations provided such as: 'I was almost there every time,' 'I'm not used to thinking anymore,' 'I should have practiced before coming.'.

4.4.3 Relationship between anagram resolution and OCEAN test

Here, we tested the relationships between variables related to participants' responses during anagram resolution (response time, anagram scores, number of instruction errors) and their scores on the OCEAN test. In each of the cases below, we tested the hypothesis that the scores for Openness, Conscientiousness, Extraversion, and agreeability are not related to different response variables, and the hypothesis that the score for Neuroticism is inversely related to the response variables.

Regarding response time, we did not find a significant correlation with scores for Openness, Conscientiousness, Extraversion and agreability ($r_{response\ time/Openness} = -0.11$, $p_{response\ time/Openness} = 0.38$, $r_{response\ time/Conscientiousness} = 0.06$, $p_{response\ time/Conscientiousness} = 0.63$, $r_{response\ time/Extraversion} = -0.06$, $p_{response\ time/Extraversion} = 0.64$, $r_{response\ time/Agreeableness} = -0.13$, $p_{response\ time/Agreeableness} = 0.29$). However, it appears that Neuroticism is weakly correlated with thinking time ($r_{response\ time/Neuroticism} = 0.24$, $p_{response\ time/Neuroticism} < 0.05$). Figure 4.3 shows the linears regression between response time and the 5 variables of the OCEAN test, with the control group data in green and the LH group data in red.

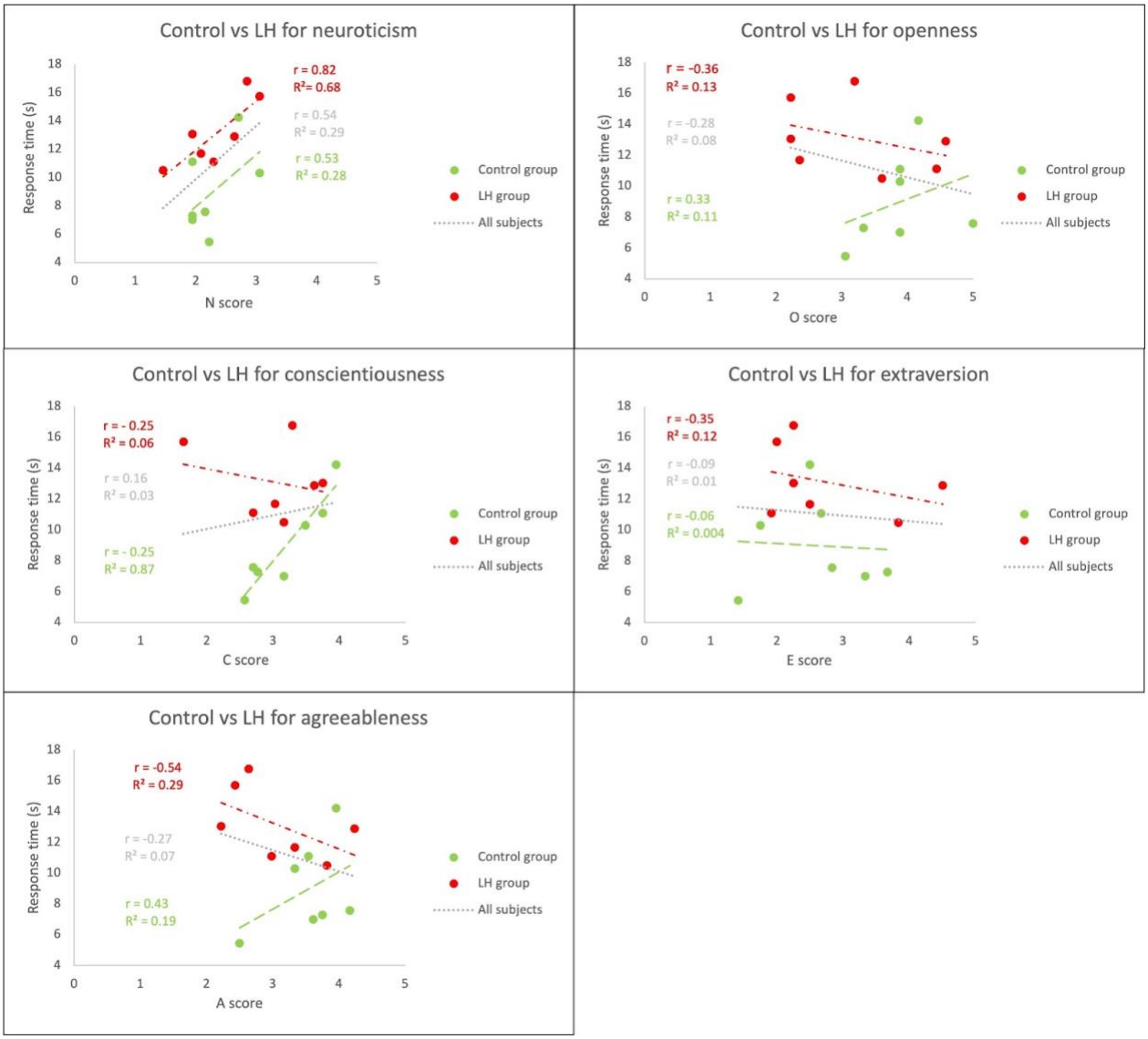

Figure 4.3. Relationship between the anagram response time and the various variables of the OCEAN personality test, including Openness (O), Conscientiousness (C), Extraversion (E), Agreeableness (A), and Neuroticism (N) separated between the groups. Control group subjects are shown in green, LH group subjects are shown in red, and all subjects grouped together are shown in gray.

Moreover, when considering only the binary value of the participant's anagram response (i.e., 1 when a correct answer was found and 0 otherwise), there is a negative and significant correlation between a correct response and the Neuroticism score on the OCEAN test ($r_{response/Neuroticism}$ = -0.29,

$p_{response/Neuroticism} < 0.013$). Using this same method, no significant correlation is found with the other OCEAN test scores ($r_{response/Openness} = 0.05$, $p_{response/Openness} = 0.69$, $r_{response/Conscientiousness} = -0.11$, $p_{response/Conscientiousness} = 0.37$, $r_{response/Extraversion} = 0.06$, $p_{response/Extraversion} = 0.64$, $r_{response/Agreeableness} = 0.08$, $p_{response/Agreeableness} = 0.52$).

Concerning the number of instruction errors, we did not find significative correlation between the number of instruction error and OCEAN score as suggested by the following p-values ($r_{Openness/instruction\ errors}(12) = -0.25$, $p_{Openness/instruction\ errors} = 0.39$, $r_{Conscientiousness/instruction\ errors}(12) = -0.14$, $p_{Conscientiousness/instruction\ errors} = 0.63$, $r_{Extraversion/instruction\ errors}(12) = -0.39$, $p_{Extraversion/instruction\ errors} = 0.17$, $r_{Agreeableness/instruction\ errors}(12) = -0.25$, $p_{Agreeableness/instruction\ errors} = 0.39$, $r_{Neuroticism/instruction\ errors}(12) = 0.31$, $p_{Neuroticism/instruction\ errors} = 0.28$).

4.4.4 Impact of LH on electrodermal activity changes

The focus here was on the differences in electrodermal signals during the resolution phases between participants in the control and LH groups and particularly on the number of peak differences. The LH group showed more peaks than the control group ($N_{peaks/LH/resolution\ phase} = 250$, $N_{peaks/control\ group/resolution\ phase} = 190$, where N is the number of peaks in the group during all the resolution phase). Moreover, a significant difference between the distribution was observed between LH group and control group in the number of peaks in participants' electrodermal signals in the global session of task ($ks(12) = 0.71$, $p < 0.05$). This means that participants in the LH group tend to have more peaks in their electrodermal signal when performing the tests than the control group.

4.4.5 Activation of DRN and the anterior caudate nucleus in the control group during solved tasks

We are interested here in testing the hypothesis that the DRN activates during a stressful stimulus and deactivates when the controllability of the stimulus is detected. The activation pattern of the BOLD signal in the DRN and in an anterior part of the left caudate nucleus showed a strong correlation with the task "thinking phase" when doing a mixed effect analyses between the participants ($z_{max} = 2.66$, $z_{threshold} > 1.8$, $p_{cluster\ correction} = 3.41 \times 10^{-2}$, $n_{voxels} = 14$, and $z_{max} = 2.96$, $z_{threshold} > 1.8$, $p_{cluster\ correction} = 2.33 \times 10^{-9}$, n-voxels = 43, respectively). Figure 4.4 shows clusters with z above 1.8 superimposed on the MNI-152 template where structures such as the DRN and an anterior part of the left caudate nucleus appear to be activated during the "thinking phase" event.

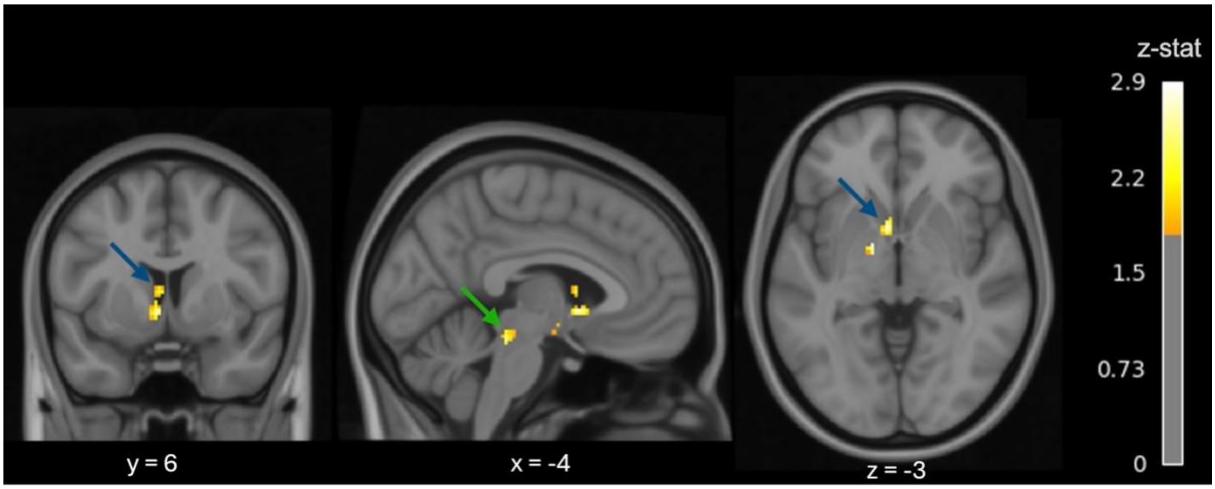

Figure 4.4. Z-statistic (thresholded at z < 1.8 and cluster corrected at p < 0.01) map for control group participants obtained from higher-level analysis carried out using a mixed effect model, superimposed on the MNI-152 template. A high z-statistic indicates a high correlation between voxel intensity over time and the event “thinking phase”. A high z-statistic is observed for voxels in the DRN and the caudate striatum. The DRN and the caudate striatum are indicated by the green and blue arrows, respectively.

4.4.6 Stronger DRN activation in the LH group during tasks

The focus here is on DRN activation in the LH group during the "thinking phase". The task-based analysis based on the “thinking phase" event shows in Figure 4.5 that many areas had high z-scores, and the 6th most significant area was located in the DRN region ($z_{max} = 4.69$, $z_{threshold} > 3.75$, $p_{cluster\ correction} = 0.0906$, $n_{voxels} = 19$) meaning that there is a strong correlation between the event and the voxel time course. Figure 4.5 shows voxels declared activated (voxels in yellow to white) at z > 3.75 and a cluster correction at p > 0.1 signifying a strong correlation between voxel time course and the "thinking phase" event.

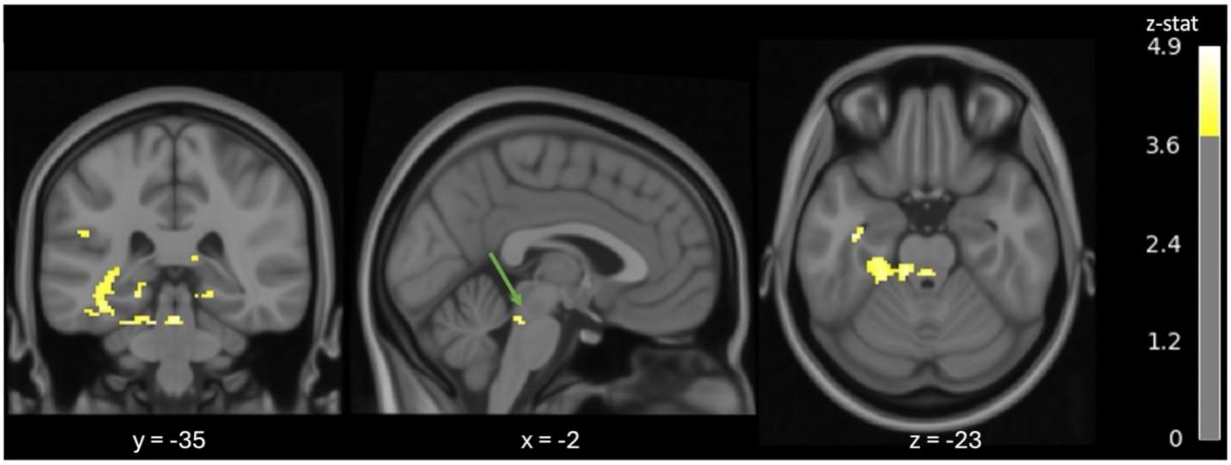

Figure 4.5. Z-statistic (thresholded at z < 3.75 and cluster corrected at p < 0.1) map for LH participants obtained from second-level analysis carried out using a mixed effect model, superimposed on the MNI-152 template. A high z-statistic indicates a high correlation between voxel intensity over time and the event "thinking phase". One cluster appears to be in the DRN region which is indicated by the green arrow.

Subsequently, we compared the difference in the correlation between DRN activation for the LH group and the control group. The results show a greater positive correlation between the voxel time course and the event "thinking phase" in a portion of the DRN when contrasting the LH group by the control group as shown in Figure 4.6 (z_{max} = 3, $z_{threshold}$ > 2.3, $p_{cluster\ correction}$ = 6.08 × 10^{-4}, n_{voxels}= 10) meaning that voxels are more correlated to the event in the LH group than in the control group.

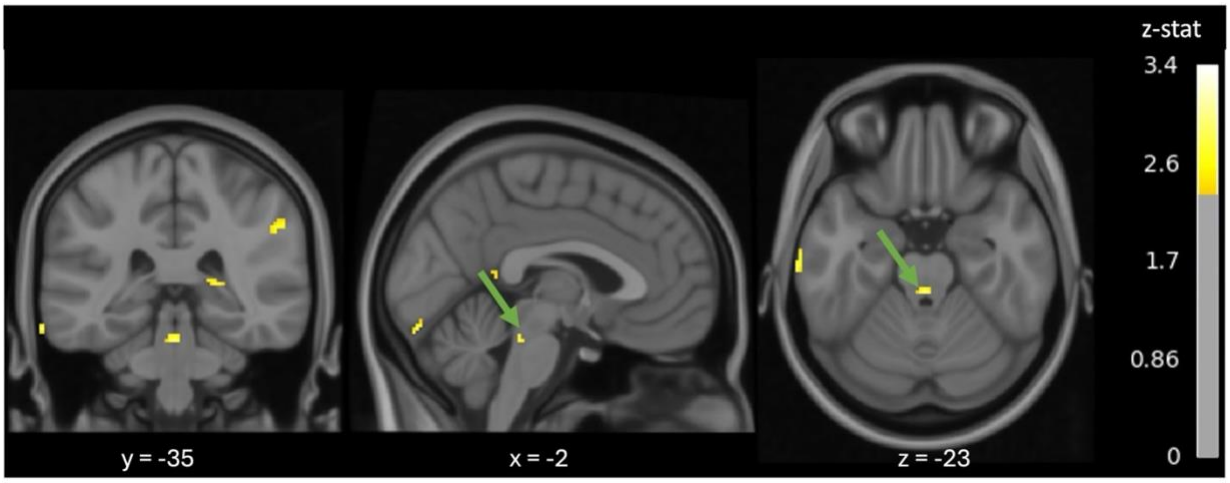

Figure 4.6. Z-statistic (thresholded at 2.3) map for LH and control group participants obtained from second-level analysis carried out using a mixed effect model and when contrasting the LH group by the control group, superimposed on the MNI-152 template. A high z-statistic indicates a large difference between LH and control group for the correlation between voxel intensity over time and the event "thinking phase". One cluster appears to be in the DRN region, as indicated by the green arrow.

4.4.7 rs-fMRI differences between the two groups

We are interested here in exploratory research to test the hypothesis that RS may be different between the control group not subjected to LH and the LH group that has been subjected to LH and to explore the region where difference appeared. This analysis revealed differences in connectivity patterns in various brain regions between the control group and the group subjected to LH. In the DRN, we observed that the mean z-statistic was higher in the LH group ($\mu_{z\text{-score}} = 2.35$, SD = 0.60) than in the control group ($\mu_{z\text{-score}} = 1.49$, SD = 0.59). A Student's t-test was conducted on this difference, resulting in a highly significant contrast ($t(147) = 12.54$, $p < 1.10^{-28}$).

Moreover, in an extensive exploratory analysis of the whole brain, by contrasting the LH group with the control group and applying a cluster correction ($p_{cluster} < 0.1$), we found that regions exhibiting stronger connectivity with the PCC (i.e, high correlation between the mean average signal within the PCC with others voxels in the brain) in the LH group, compared to the control group (as highlighted by the voxels in red and yellow in Figure 4.7) were located within the DRN (indicated by the green arrow). Conversely, in the case of the control group, the posterior Superior

Temporal Gyrus showed greater connectivity with the PCC (indicated by the blue arrow), compared to the LH group as highlighted by the blue voxels in Figure 4.7). Thus, Figure 4.7 shows the RS of the LH group contrasted by the control group, the resulting map of RS analysis being based on the strong correlation between the participants' time course voxels with their temporal signal (spatial average) from the PCC. The statistical map is thresholded at $z > 1.8$ and $z < -1.8$ and a cluster correction is applied at $p < 0.1$.

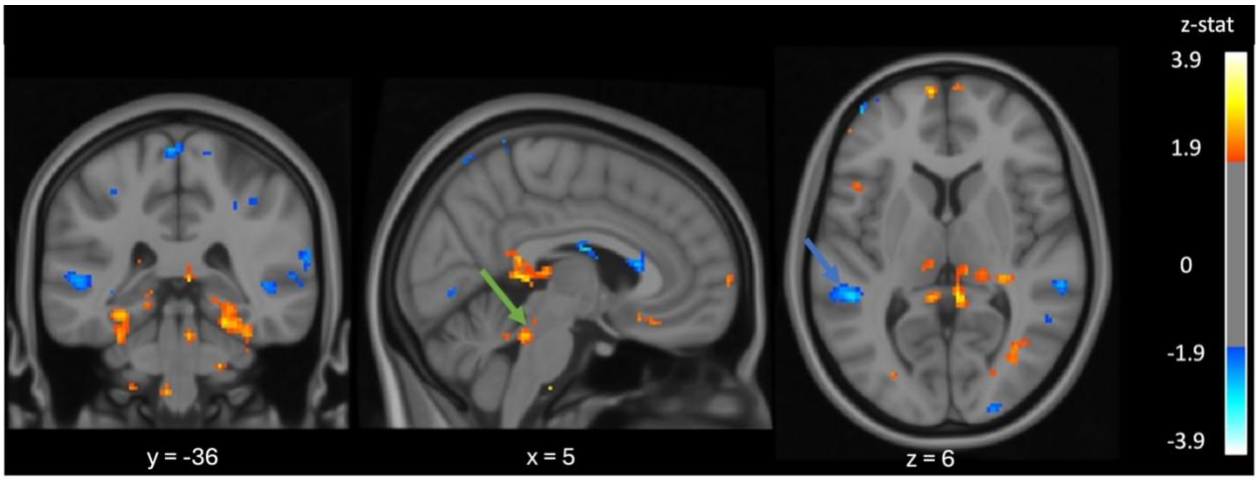

Figure 4.7. Z-statistic (thresholded at +/- 1.8 and cluster corrected at $p < 0.1$) map for LH and control group participants obtained from higher-level analysis carried out using a mixed effect model, superimposed on the MNI-152 template. A high z-statistic (red and yellow voxels) indicates a high correlation between voxel signals from LH and the PCC seed signal and a high negative z-statistic (blue voxels) indicates a high correlation between voxel signals from control group and the PCC seed signal. One cluster appears to be in the DRN region in the LH group which is indicated by the green arrow and one cluster appears to be in the posterior superior temporal gyrus which is indicated by the blue arrow.

4.5 Discussion

The aim of this research was to study the effects of LH using a novel experimental setup and metrics: On one hand, we sought to understand the impact of personality traits on the effects of learned helplessness in a cognitive task and, on the other, to demonstrate the effect of LH on physiological phenomena. In addition, the aim of this study was to show that it was possible to measure global activation of the DRN during thinking phases. Finally, the main objective of this

research was to show the lasting negative effect of LH over time and thus to demonstrate that, like trauma, changes in connectivity maps could be observed in the LH group versus the control group.

An important point to note, which limits our findings, is that the control group and the LH group are not properly balanced in terms of participants' gender. Specifically, the control group consists of 5 men and 2 women, while the LH group comprises 4 women and 3 men. This disparity in participants' gender may either attenuate or accentuate certain observed phenomena. Indeed, the RS differs between men and women (Filippi et al., 2013), potentially resulting in differences between the LH and control groups beyond the experience of LH. To better target the effects of IA, a later study could take care to have groups of participants made up of the same proportions in terms of gender.

Another important point for future studies using unsolvable anagrams in cognitive testing will be to check that the words given have no possible answer in other languages in which the participants might speak. In fact, one of the words given in French, "germe", attracted responses in English with the word "merge". This deviation from the initial protocol was taken into account in the statistical analysis, so that this case was not taken into account.

Regarding the results of the OCEAN test for the selected participants, it appears that certain measures from the test (Openness and Agreeableness, Agreeableness and Extraversion) are significantly positively correlated in the selected sample and Neuroticism is negatively correlated to Extraversion. A meta-analysis from 2010 combining the results of 212 OCEAN studies shows that variables among this test are correlated (Van Der Linden et *al*., 2010). Moreover, the study from Van Der Linden et al. shows that Neuroticism is negatively correlated to the other OCEAN variables when the other variables are positively correlated to the others. Our study has not found a significant negative correlation between Neuroticism and the other OCEAN variables (other than Extraversion) and not all OCEAN variables (other than Neuroticism) were intercorrelated. It's possible that our sample is biased compared to one that would better characterize the overall human population (participants are young and mostly students). Increasing the number of older participants in diverse life situations may help reduce bias in the sample.

In the selected sample, the results of the OCEAN scores seem to be related to the variables concerning anagram resolution. Specifically, Neuroticism is significantly and negatively correlated with response time and the number of correct answers. This result confirms the finding of the study of Beckmann and al. in 2013 showing that a high score for Neuroticism is negatively related with performance (Beckmann et al., 2013). However, in our study data seems to only show a linear fit between Neuroticism and performance unlike the study of Beckmann *et al*. which found a quadratic relation between Neuroticism and task performance. A sample with a lower Neuroticism score can help to see whether a Neuroticism score below a certain value tends to decrease performance on the task, as in the study by Beckmann et *al*.. It is therefore possible that the effects of LH are accentuated by Neuroticism in individuals because people with higher neurotic scores might perceive the source of their failure as being more easily the result of their own incompetence. In consequence, they could be more passive after the first failure during the test and found the response slower. In addition, other personality characteristics seem to go in the direction of attenuating the harmful effects of LH. It's possible that an agreeable person will more readily accept they are not perceived as performing well. Similarly, an open-minded person is more likely to accept their own failures and bounce back more easily in the future. It would therefore be interesting, by increasing the number of participants, to see whether Agreeableness and Extraversion have positive effects on the deleterious effects of LH. A simpler protocol experiment (without fMRI acquisition) could allow to have a larger sample.

Concerning the impact of LH on resolution variables, there is a significant increase in response time in the LH group. This suggests that our study succeeded in impacting participants in the LH group. There are also several self-deprecating responses and attitudes in the LH group. These results highlight the real and negative effect of LH during the task execution period, as suggested by previous studies (Meine et *al*., 2020; Valås, 2001). Moreover, it confirms that a simple task such as the resolution of unsolvable anagrams can lead to observable effects of LH.

In the same vein, there is a significant difference between the distribution in the number of sudden variations in the electrodermal signal of LH group and control group. Therefore, for the LH group, it’s possible that during phases where participants are exploring the nature of controllability, LH

participants find it more difficult to obtain a response and thus experience more emotional variations.

fMRI revealed that a part of the DRN was more activated during the thinking phase of participants in the control group, which is in direct agreement with the article by Grahn et *al*. (1999). Indeed, since participants in the control group are more likely to find a response and the DRN is supposed to deactivate when controllability is detected, this justifies the fact that we do indeed obtain a good correlation between the event and the temporal signal in this region. Moreover, the prefrontal cortex is not declared activated during the resolution phase. It's possible that the pre-frontal cortex doesn't deactivate after the button is pressed and the anagram is solved. It could be that the participant checks his answer several times, and thus continues to think about the problem, without the DRN being activated, since controllability has been detected. Thus, the pre-frontal cortex would not be declared activated, since the "thinking phase" event would not characterize the activation/deactivation of the pre-frontal cortex. Nevertheless, this result needs to be looked at carefully. In fact, even if the cluster corrected threshold of $p < 0.01$ is a commonly used value (Chen et *al.*, 2018; Woo et *al.*, 2014; Yeung, 2018), the z statistic threshold of 1.8 is not and is more commonly set at 2.3 or even 3.1 and more (Cai et *al.*, 2023; Criss et *al.*, 2021). In addition, one of the limitations in our study was the low temporal continuity of participants' data. Indeed, having to request responses from participants after every three anagrams proved to be impractical during data analysis. However, it was observed that, in the context of unsolvable anagrams, breaks are necessary to verify responses. It might be considered in another type of unsolvable cognitive test to conduct a single acquisition sequence, but one that is longer. Furthermore, in the LH group, it was observed that some of the voxels in the DRN are declared activated, meaning that we found a correlation between these voxels' time course and the “thinking phase” event. However, the cluster correction threshold set at $p < 0.1$ is not a commonly used value. Indeed, this result needs to be looked at carefully. There are multiple regions that appear in the map that are not known, to the best of our knowledge, to be related to LH or to a stressful stimulus. The main limitation of our protocol in this case is that the "thinking phase" event may poorly predict DRN activation. In fact, it was assumed in the beginning that at the start of each new acquisition sequence, the DRN would be deactivated and reactivated when the first anagram was projected. However, it is possible that the DRN will not deactivate between sequences during the discussion phases with the participant

(checking answers, displaying scores). A continuous acquisition of data over time could lead to a better model to be set up in order to correctly predict DRN activation and deactivation during LH experiments.

Finally, the RS phase demonstrated that the connectivity with a region of the DMN (the PCC) differed between the two groups. In the LH group, the DRN is much more connected with the PCC than in the control group. This could suggest that LH affects participants even after the resolution period. Interestingly, DMN changes are also observed in psychological disorders such as attention deficit hyperactivity disorder, obsessive-compulsive disorder, post-traumatic stress disorder and schizophrenia (Sha et *al*., 2019). It would be interesting to understand in a later study with a higher degree of confidence (greater z-threshold and cluster correction) by increasing the number of participants to localize with a greater precision the regions that differ between a non-LH group and the LH group. The LH induced by this very simple experiment shows that the consequences of experiencing unpleasant events ranging from a simple frustrating experience to a true traumatic experience is probably more of a spectrum. Indeed, it's possible that this simple experience, even if it induces less damage to individuals than a traumatic experience, still induces a slight modification of connectivity in the RS for a short time period. Interestingly, several regions affected by post-traumatic stress disorder (PTSD) such as the vmPFC and caudate nuclei (Fenster et *al*., 2018) are also heavily involved in the controllability detection phenomenon as suggested by Maier et al., 2016 (Maier & Seligman, 2016). Future studies could further increase the time between LH-inducing tasks and the rs-fMRI to determine for how long RS connections differ between the two groups. When a certain period of time between the LH-inducing tasks and rs-fMRI suggests that the LH experiment no longer has any impact on the RS, it would be interesting to repeat the experiment of LH-inducing tasks with the same task several times to see whether increasing the number of LH-inducing tasks can increase the period during which differences are observable on functional connectivity maps in rs-fMRI between control group and LH group. These future experiments could be used to create a model for better predicting and understanding LH generated by events that are non-traumatizing *a priori* but have lasting impacts on individuals.

4.6 Conclusion

The findings presented here serve as significant milestones in unveiling the enduring impact of LH on individuals over time. The observed distinctions in resting states between the test and control groups underscore the profound consequences of LH on the structural dynamics of the brain. This study suggests that LH has the potential to disrupt the intricate connections between various brain regions. Consequently, it becomes evident that beyond its initial unpleasant and seemingly virtual nature, LH possesses the capacity to inflict long-term harm on individuals. This crucial insight into the enduring repercussions of LH carries profound implications for the management of individuals within organizational contexts. Acknowledging and addressing the potential neurobiological alterations induced by learned helplessness becomes imperative for fostering a healthier and more resilient workforce.

4.7 Acknowledgements

We extend our appreciation to the staff at the Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle of the Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal for their support and collaboration, as well as the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Discovery Grant number RGPIN-2017-05632. We would also like to thank Jan Valosek, who was a great help in drafting the methodology of the fMRI and rs-fMRI data.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette recherche vise à évaluer la façon dont l'IA affecte divers aspects cognitifs et neurologiques, notamment en utilisant l'IRMf, le test de personnalité OCEAN, les variables liées à la résolution des anagrammes, le signal électrodermal et le rs-fMRI. Par ailleurs, l'objectif principal de cette recherche était de mesurer les différences dans l'activation cérébrale entre les individus exposés à une situation d'IA et ceux qui ne l'étaient pas. Elle se distingue notamment en explorant l'impact de l'IA sur les états de repos post-expérience. Les résultats révèlent des associations intrigantes qui nécessitent une exploration approfondie dans les futures recherches. La méthodologie utilisée lors de cette recherche pourra par la suite être améliorée afin de déterminer avec plus de précision les différences entre le groupe soumis à l'impuissance et celui de contrôle. Par ailleurs, plusieurs résultats de cette étude pourront servir de pilier afin de standardiser de meilleures pratiques de gestion prenant en compte l'IA dans la façon dont sont administrés les organisations et la gestion des équipes et des employés.

L'objectif secondaire numéro 1 de cette recherche était de construire un protocole expérimental qui puisse être accepté par le comité d'éthique de l'UNF ce qui a été réalisé. De plus, ce protocole devait permettre d'induire de l'impuissance apprise chez les participants du groupe d'IA lorsqu'ils étaient dans le scanner IRM. Les résultats ont montré une augmentation significative du temps de réponse dans le groupe d'IA par rapport au groupe de contrôle, suggérant que notre étude a réussi à influencer les participants de ce groupe, mettant en évidence les effets réels et négatifs de l'IA pendant la période d'exécution de la tâche. En addition de la diminution de la performance des participants du groupe IA, ce groupe témoigne d'une augmentation significative du nombre de variations soudaines dans le signal électrodermal. Ceci permet de rejeter l'hypothèse nulle qui a été formulée dans l'objectif secondaire numéro 5. Par conséquent, pour le groupe IA, pendant les phases où les participants explorent la nature de la contrôlabilité, ils ont plus de difficulté à obtenir une réponse et connaissent plus de variations émotionnelles. En plus de diminuer la performance des participants, l'IA les met dans un état de stress plus intense dans le test que les participants qui n'ont pas été soumis à des tâches impossibles. De la même façon, des phrases négatives envers eux-mêmes n'ont été notées que dans le groupe d'IA ce qui montre que la perception qu'ils ont d'eux-mêmes est dégradée lors de ce test.

L’objectif secondaire numéro 2 était de choisir les bonnes anagrammes pour évaluer correctement les performances des participants lors de la résolution de celles-ci. En effet, choisir des anagrammes trop simples impliquait des hauts taux de réussite pour tous les participants masquant ainsi l’effet de l’IA. Au contraire, le choix d’anagrammes trop difficiles aurait pu induire de l’IA dans le groupe de contrôle et ainsi masquer les différences entre les deux groupes. Ainsi, un site internet a été créé à l’aide d’ERP libre qui permettait de mettre en place un questionnaire chronométré afin d’évaluer le temps de résolutions de plusieurs anagrammes. Les participants de ce test n’étaient pas les mêmes participants réalisant les anagrammes dans le scanner IRM. Les résultats de ce test ont permis de choisir, selon les besoins de cette recherche, les anagrammes communes entre les groupes ainsi que les anagrammes seulement présentées au groupe de contrôle. Cependant, ce protocole n’a pas réussi à montrer de façon significative que le groupe LH avait une proportion d’anagramme résolue inférieure au groupe de contrôle. Afin, d’avoir des résultats plus précis sur ce phénomène il pourrait être intéressant de revisiter ce protocole afin d’en diminuer les coûts pour augmenter le nombre de participants et ainsi comprendre l’effet de l’impuissance apprise sur le score final des participants du groupe d’IA.

L’objectif secondaire numéro 3 de cette étude était de mettre en place un questionnaire en ligne afin de faire réaliser le test OCEAN aux participants pour simplifier l’analyse des tests et leur réalisation. Ce questionnaire a été réalisé à l’aide d’ERP libre. Finalement, l’utilisation d’ERP libre s’est révélée simple et efficace dans la réalisation des passages des test OCEAN aux participants. D’une part, puisque la réalisation du site peut se réaliser sans connaissance préalable à création de site internet et d’autre part puisque l’extraction des données peut très simplement se réaliser sous format CSV et être traité sur Python comme le montre l’annexe E.

L’objectif secondaire numéro 4 concernait l’activation du DRN lors de la résolution des anagrammes par les participants. Il avait été fait l’hypothèse que le DRN s’activerait lorsque le stimulus stressant (i.e. l’anagramme à l’écran) apparaîtrait et se désactiverait lorsque la contrôlabilité serait détectée (i.e. lorsque l’anagramme a été résolue). L'IRMf a révélée qu'une partie du DRN était significativement plus activée pendant les périodes de résolution des participants du groupe contrôle, ce qui est en accord direct avec l'article de Grahn et *al.* (1999). Ceci s’expliquerait par le fait que lorsque l’anagramme apparaît, les régions détectant la contrôlabilité de l’événement stressant, et donc la possibilité de déterminer une réponse à

l'anagramme, n'active pas encore le circuit inhibiteur du DRN entre le vmPFC et le DRN. Cependant, dès lors que la réponse est déterminée, et que la participant appuie sur la boîte de réponse, ce circuit est activé et permet l'inhibition du DRN et donc sa désactivation. Ainsi, cela expliquerait pourquoi le signal du DRN est correctement corrélé aux périodes de résolutions d'anagrammes chez les participants du groupe de contrôle. Dans le cas des participants du groupe d'IA, les résultats montrent moins de voxels déclarés activés dans le DRN mais présentent plusieurs zones avec de fortes valeurs z-statistiques. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le protocole ne permette pas de correctement prédire l'activation du DRN avec les phases de résolutions dans le groupe d'IA. En effet, il a été supposé qu'au début de chaque nouvelles séquences d'acquisitions, le DRN serait désactivé et réactivé lors de la projection de la première anagramme. Cependant, il est possible que le DRN ne se désactive pas entre les séquences pendant les phases de discussion avec le participant (vérification des réponses, affichage des scores). Ainsi, il est possible que le DRN soit activé quelques instants avant l'affichage de la première anagramme de la séquence. Afin de corriger ce problème, il faudrait lors d'une future expérience déterminer un moyen de n'avoir qu'une acquisition continue des données au fil du temps. Cette acquisition continue pourrait permettre de mettre en place un meilleur modèle afin de prédire correctement l'activation et la désactivation du DRN au cours des expériences LH. La principale limitation pour cet objectif secondaire pour le groupe LH dans ce protocole était donc le découpage des séquences de résolutions. Il est tout de même à noter que cette contrainte était obligatoire puisqu'il était nécessaire d'obtenir les réponses des participants dans la mesure où ils devaient se souvenir de leurs réponses. Ainsi, de futures expériences devront trouver un protocole permettant une acquisition continue pour mieux prédire l'activation et la désactivation du DRN dans le cas d'expérience d'impuissance.

L'objectif secondaire numéro 6 était basé sur l'hypothèse qu'il serait possible d'observer des différences dans les cartes de connectivités fonctionnelles entre les participants du groupe de contrôle et de groupe d'IA. La phase RS a démontré que la connectivité avec une région du DMN (le PCC) différait entre les deux groupes. Dans le groupe LH, le DRN est beaucoup plus connecté au PCC que dans le groupe contrôle. Cela pourrait suggérer que l'apprentissage de l'impuissance affecte les participants même après la période de résolution. Ainsi, ce résultat est une première étape pour montrer que même des événements d'IA simple, c'est-à-dire reliés à des évènements qui n'ont pas *a priori* d'importance pour le participant (la résolution d'anagramme) pourrait

montrer des différences dans les cartes de connectivité fonctionnelle entre des participants soumis à l'IA et d'autres qui n'y sont pas soumis. Il est envisageable que même une expérience relativement légère, bien qu'elle cause moins de dommages que des expériences traumatisantes, puisse entraîner une légère altération de la connectivité dans le repos sur une brève période. Il est intéressant de noter que plusieurs régions du cerveau affectées par les TSPT, telles que le vmPFC et les noyaux caudés (Fenster et al., 2018), sont également fortement impliquées dans le processus de détection de la contrôlabilité (Maier et Seligman, 2016). Finalement, il serait intéressant de voir dans une prochaine étude si des situations induisant de l'IA dans les organisations peuvent altérer la connectivité fonctionnelle des employés ce qui impliquerait une revisite urgente des méthodes de gestion. Plusieurs situations sont connues pour induire de l'IA dans les organisations, telles qu'évoquées dans le Tableau 2.1, tout le défi reste à montrer avec une meilleure confiance qu'une expérience d'IA simple peut réellement altérer la connectivité fonctionnelle entre plusieurs régions et qu'il en est de même pour les expériences d'IA en organisation. Ce protocole a néanmoins permis de montrer que des différences de connectivités fonctionnelles pouvaient être observées entre les deux groupes à la suite du test d'impuissance apprise avec un niveau de confiance assez élevé. Une étude postérieure pourrait donc s'intéresser à augmenter ce niveau de confiance en augmentant notamment le nombre de participant.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Cette recherche met en lumière les défis inhérents à l'étude des circuits complexes sous-tendant le mécanisme de l'impuissance apprise. Les limitations technologiques actuelles des scanners IRM 3T entravent la compréhension détaillée de la transmission de l'information entre des zones cruciales pour notre étude, telles que le vmPFC, le striatum caudate, ou le DRN. Néanmoins, malgré ces contraintes, cette recherche démontre la possibilité d'analyser les phénomènes globaux, illustrée par l'activation observable du DRN lors des phases de réflexion, les effets mesurables sur le temps de réponse entre les groupes et l'impact de l'IA sur la phase de repos post-essais. Dans le contexte du fonctionnement des organisations, ce sont les résultats à long terme de l'impuissance apprise sur les individus qui revêtent une importance cruciale. Les conclusions de cette étude mettent en évidence les effets redoutables et possibles de l'IA sur les membres d'une organisation, conduisant potentiellement à une paralysie face à toute évolution positive. En dernier lieu, cette recherche souligne l'urgence pour les dirigeants d'organisations d'accorder une attention particulière à l'IA, un phénomène encore largement méconnu et insuffisamment intégré aux méthodes de gestion couramment enseignées et appliquées dans la plupart des structures organisationnelles. Cette lacune de compréhension souligne la nécessité d'une sensibilisation accrue et d'une adaptation des pratiques de gestion pour prévenir les effets délétères de l'impuissance apprise au sein des équipes.

RÉFÉRENCES

Abramson, L. Y., & Seligman, M. E. P. (1978). *Learned Helplessness in Humans : Critique and Reformulation*. 26.

Allen, B. P., & Potkay, C. R. (1981). On the arbitrary distinction between states and traits. *Journal of Personality and Social Psychology*, *41*(5), 916-928. https://doi.org/10.1037/0022-3514.41.5.916

Allport, G. W., & Odbert, H. S. (1936). Trait-names : A psycho-lexical study. *Psychological Monographs*, *47*(1), i-171. https://doi.org/10.1037/h0093360

Amat, J., Aleksejev, R. M., Paul, E., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (2010). Behavioral control over shock blocks behavioral and neurochemical effects of later social defeat. *Neuroscience*, *165*(4), 1031-1038. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.11.005

Amat, J., Baratta, M. V., Paul, E., Bland, S. T., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (2005). Medial prefrontal cortex determines how stressor controllability affects behavior and dorsal raphe nucleus. *Nature Neuroscience*, *8*(3), 365-371. https://doi.org/10.1038/nn1399

Amat, J., Christianson, J. P., Aleksejev, R. M., Kim, J., Richeson, K. R., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (2014). Control over a stressor involves the posterior dorsal striatum and the act/outcome circuit. *European Journal of Neuroscience*, *40*(2), 2352-2358. https://doi.org/10.1111/ejn.12609

Amat, J., Paul, E., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (2008). Activation of the ventral medial prefrontal cortex during an uncontrollable stressor reproduces both the immediate and long-term protective effects of behavioral control. *Neuroscience*, *154*(4), 1178-1186. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2008.04.005

Andersson, J. L. R., & Jenkinson, M. (2007). *Non-linear registration aka Spatial normalisation*. https://www.fmrib.ox.ac.uk/datasets/techrep/tr07ja2/tr07ja2.pdf

Andersson, J. L. R., Skare, S., & Ashburner, J. (2003). How to correct susceptibility distortions in spin-echo echo-planar images : Application to diffusion tensor imaging. *NeuroImage*, *20*(2), 870-888. https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00336-7

Anticevic, A., Cole, M. W., Murray, J. D., Corlett, P. R., Wang, X.-J., & Krystal, J. H. (2012). The role of default network deactivation in cognition and disease. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(12), 584-592. https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.008

Ashforth, B. E. (1990). The Organizationally Induced Helplessness Syndrome : A Preliminary Model. *Canadian Journal of Administrative Sciences / Revue Canadienne Des Sciences de l'Administration*, *7*(3), 30-36. https://doi.org/10.1111/j.1936-4490.1990.tb00532.x

Aziz-Zadeh, L., Kaplan, J. T., & Iacoboni, M. (2009). "Aha!" : The neural correlates of verbal insight solutions. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 908-916. https://doi.org/10.1002/hbm.20554

Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*(6), 575-589. https://doi.org/10.1016/S0022-5371(75)80045-4

Baker, K. G., Halliday, G. M., & Törk, I. (1990). Cytoarchitecture of the human dorsal raphe nucleus : HUMAN DORSAL RAPHE. *Journal of Comparative Neurology*, *301*(2), 147-161. https://doi.org/10.1002/cne.903010202

Baratta, M. V., & Maier, S. F. (2019). New tools for understanding coping and resilience. *Neuroscience Letters*, *693*, 54-57. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.09.049

Bauer, H., Pripfl, J., Lamm, C., Prainsack, C., & Taylor, N. (2003). Functional neuroanatomy of learned helplessness. *NeuroImage*, *20*(2), 927-939. https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00363-X

Beckmann, N., Beckmann, J. F., Minbashian, A., & Birney, D. P. (2013). In the heat of the moment : On the effect of state neuroticism on task performance. *Personality and Individual Differences*, *54*(3), 447-452. https://doi.org/10.1016/j.paid.2012.10.022

Blythe, J., Mansueto, A. C., Duken, S. B., & Cremers, H. (2022). *The generalization of behavioral control over physical threats to social stressors in humans : A pilot fMRI study.* [Preprint]. PsyArXiv. https://doi.org/10.31234/osf.io/suw45

Bollini, A. M., Walker, E. F., Hamann, S., & Kestler, L. (2004). The influence of perceived control and locus of control on the cortisol and subjective responses to stress. *Biological Psychology*, *67*(3), 245-260. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2003.11.002

Bräscher, A.-K., Becker, S., Hoeppli, M.-E., & Schweinhardt, P. (2016). Different Brain Circuitries Mediating Controllable and Uncontrollable Pain. *The Journal of Neuroscience*, *36*(18), 5013-5025. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1954-15.2016

Cai, Z., Von Ellenrieder, N., Koupparis, A., Khoo, H. M., Ikemoto, S., Tanaka, M., Abdallah, C., Rammal, S., Dubeau, F., & Gotman, J. (2023). Estimation of FMRI responses related to epileptic discharges using BAYESIAN hierarchical modeling. *Human Brain Mapping*, *44*(17), 5982-6000. https://doi.org/10.1002/hbm.26490

Carlson, D. S., & Kacmar, K. M. (1994). Learned helplessness as a predictor of employee outcomes : An applied model. *Human Resource Management Review*, *4*(3), 235-256. https://doi.org/10.1016/1053-4822(94)90014-0

Cemalcilar, Z., Canbeyli, R., & Sunar, D. (2003). Learned Helplessness, Therapy, and Personality Traits : An Experimental Study. *The Journal of Social Psychology*, *143*(1), 65-81. https://doi.org/10.1080/00224540309598431

Charnay, Y., & Leger, L. (2010). Brain serotonergic circuitries. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *12*(4), 471-487. https://doi.org/10.31887/DCNS.2010.12.4/ycharnay

Chen, X., Lu, B., & Yan, C. (2018). Reproducibility of R-fMRI metrics on the impact of different strategies for multiple comparison correction and sample sizes. *Human Brain Mapping*, *39*(1), 300-318. https://doi.org/10.1002/hbm.23843

Criss, C., Lepley, A., Simon, J., Onate, J., Clark, B., & Grooms, D. (2021). Neural Markers

of Knee Disability in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : A Multicenter fMRI Study (108). *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, *9*(10_suppl5), 2325967121S0025. https://doi.org/10.1177/2325967121S00258

Doya, K. (Ed.). (2007). *Bayesian Brain : Probabilistic Approaches to Neural Coding*. https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=bsQMWXXHzrYC&oi=fnd&pg=PR9&dq=bayesian+brain&ots=LJmYhNyRxm&sig=iwpPfNrAg_HrMfcTkblFwOZcOQQ&redir_esc=y#v=onepage&q=bayesian%20brain&f=false

Epting, F. R., & Paris, M. E. (2006). A Constructive Understanding of the Person : George Kelly and Humanistic Psychology. *The Humanistic Psychologist*, *34*(1), 21-37. https://doi.org/10.1207/s15473333thp3401_4

Fenster, R. J., Lebois, L. A. M., Ressler, K. J., & Suh, J. (2018). Brain circuit dysfunction in post-traumatic stress disorder : From mouse to man. *Nature Reviews Neuroscience*, *19*(9), 535-551. https://doi.org/10.1038/s41583-018-0039-7

Filippi, M., Valsasina, P., Misci, P., Falini, A., Comi, G., & Rocca, M. A. (2013). The organization of intrinsic brain activity differs between genders : A resting-state fMRI study in a large cohort of young healthy subjects. *Human Brain Mapping*, *34*(6), 1330-1343. https://doi.org/10.1002/hbm.21514

Fincham, F. D., & Hokoda, A. J. (1987). Learned helplessness in social situations and sociometric status. *European Journal of Social Psychology*, *17*(1), 95-111. https://doi.org/10.1002/ejsp.2420170109

Fonov, V., Evans, A. C., Botteron, K., Almli, C. R., McKinstry, R. C., & Collins, D. L. (2011). Unbiased average age-appropriate atlases for pediatric studies. *NeuroImage*, *54*(1), 313-327. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.033

Friston, K. (2010). The free-energy principle : A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(2), 127-138. https://doi.org/10.1038/nrn2787

Gartner, W. B., & Naughton, M. J. (1988). The Deming Theory of ManagementA review of Out of the Crisis, by Deming W. Edwards. Cambridge, MA : MIT Center for Advanced Engineering Study, 1986, 500 pp., $60.00, cloth;Deming Guide to Achieving Quality and Competitive Position, by Gitlow Howard W. & Gitlow Shelly J.. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986, 192 pp., $24.95, cloth;The Keys to Excellence: The Story of the Deming Philosophy, by Mann Nancy. Santa Monica, CA: Preswick Books, 1986, 155 pp., $16.95, cloth;The Deming Route to Quality and Productivity: Roadmaps and Roadblocks, by Scherkenbach William W.. Milwaukee, WI: American Society for Quality Control, 1986, 149 pp., $25.00, cloth;The Deming Management Method, by Walton Mary. New York: Dodd, Mead, & Company, 1986, 288 pp., $9.95, cloth. *Academy of Management Review*, *13*(1), 138-142. https://doi.org/10.5465/amr.1988.4306817

Gerlach, K. D., Spreng, R. N., Gilmore, A. W., & Schacter, D. L. (2011). Solving future problems : Default network and executive activity associated with goal-directed mental simulations. *NeuroImage*, *55*(4), 1816-1824. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.030

Gordon, J. K., & Kindred, N. K. (2011). Word retrieval in ageing : An exploration of the task

constraint hypothesis. *Aphasiology*, *25*(6-7), 774-788. https://doi.org/10.1080/02687038.2010.539699

Graeff, F. G., Viana, M. B., & Mora, P. O. (1997). Dual role of 5-HT in defense and anxiety. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *21*(6), 791-799. https://doi.org/10.1016/S0149-7634(96)00059-0

Grahn, R. E., Will, M. J., Hammack, S. E., Maswood, S., McQueen, M. B., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (1999). Activation of serotonin-immunoreactive cells in the dorsal raphe nucleus in rats exposed to an uncontrollable stressor. *Brain Research*, *826*(1), 35-43. https://doi.org/10.1016/S0006-8993(99)01208-1

Gusnard, D. A., Akbudak, E., Shulman, G. L., & Raichle, M. E. (2001). Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity : Relation to a default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(7), 4259-4264. https://doi.org/10.1073/pnas.071043098

Havranek, M. M., Bolliger, B., Roos, S., Pryce, C. R., Quednow, B. B., & Seifritz, E. (2016). Uncontrollable and unpredictable stress interacts with subclinical depression and anxiety scores in determining anxiety response. *Stress*, *19*(1), 53-62. https://doi.org/10.3109/10253890.2015.1117449

Henderson, R. K., Snyder, H. R., Gupta, T., & Banich, M. T. (2012). When Does Stress Help or Harm? The Effects of Stress Controllability and Subjective Stress Response on Stroop Performance. *Frontiers in Psychology*, *3*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00179

Jenkinson, M., Bannister, P., Brady, M., & Smith, S. (2002). Improved Optimization for the Robust and Accurate Linear Registration and Motion Correction of Brain Images. *NeuroImage*, *17*(2), 825-841. https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1132

Jenkinson, M., Beckmann, C. F., Behrens, T. E. J., Woolrich, M. W., & Smith, S. M. (2012). FSL. *NeuroImage*, *62*(2), 782-790. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.015

Jenkinson, M., & Smith, S. (2001). A global optimisation method for robust affine registration of brain images. *Medical Image Analysis*, *5*(2), 143-156. https://doi.org/10.1016/S1361-8415(01)00036-6

John, O. P., Donahue, E. M., & Kentle, R. L. (2012). *Big Five Inventory* [jeu de données]. https://doi.org/10.1037/t07550-000

Kennis, M., Van Rooij, S. J. H., Van Den Heuvel, M. P., Kahn, R. S., & Geuze, E. (2016). Functional network topology associated with posttraumatic stress disorder in veterans. *NeuroImage: Clinical*, *10*, 302-309. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2015.12.008

Klapp, S. T. (1987). 1. Short-Term Memory Limits in Human Performance. In *Advances in Psychology* (Vol. 47, p. 1-27). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62305-5

Koikkalainen, J., Hirvonen, J., Nyman, M., Lötjönen, J., Hietala, J., & Ruotsalainen, U. (2007). Shape variability of the human striatum—Effects of age and gender.

NeuroImage, *34*(1), 85-93. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.08.039

Levinson, S., Miller, M., Iftekhar, A., Justo, M., Arriola, D., Wei, W., Hazany, S., Avecillas-Chasin, J. M., Kuhn, T. P., Horn, A., & Bari, A. A. (2023). A structural connectivity atlas of limbic brainstem nuclei. *Frontiers in Neuroimaging*, *1*, 1009399. https://doi.org/10.3389/fnimg.2022.1009399

Maier, S. F., Grahn, R. E., Kalman, B. A., Sutton, L. C., Wiertelak, E. P., & Watkins, L. R. (1993). *The Role of the Amygdala and Dorsal Raphe Nucleus in Mediating the Behavioral Consequences of Inescapable Shock*. 12.

Maier, S. F., Grahn, R. E., Maswood, S., & Watkins, L. R. (1995). The benzodiazepine receptor antagonists flumazenil and CGS8216 block the enhancement of fear conditioning and interference with escape behavior produced by inescapable shock. *Psychopharmacology*, *121*(2), 250-258. https://doi.org/10.1007/BF02245636

Maier, S. F., & Seligman, M. E. P. (1976a). *Learned Helplessness : Theory and Evidence*. 44.

Maier, S. F., & Seligman, M. E. P. (1976b). *Learned Helplessness : Theory and Evidence*. 44.

Maier, S. F., & Seligman, M. E. P. (2016). Learned helplessness at fifty : Insights from neuroscience. *Psychological Review*, *123*(4), 349-367. https://doi.org/10.1037/rev0000033

Makowski, D., Pham, T., Lau, Z. J., Brammer, J. C., Lespinasse, F., Pham, H., Schölzel, C., & Chen, S. H. A. (2021). NeuroKit2 : A Python toolbox for neurophysiological signal processing. *Behavior Research Methods*, *53*(4), 1689-1696. https://doi.org/10.3758/s13428-020-01516-y

Mangin, T., Audiffren, M., & André, N. (2023). Réflexions théoriques et méthodologiques autour du concept de fatigue cognitive. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, *120*, 5-24. https://doi.org/10.1051/sm/2023001

Marín-Morales, A., Bueso-Izquierdo, N., Hidalgo-Ruzzante, N., Pérez-García, M., Catena-Martínez, A., & Verdejo-Román, J. (2022). "Would You Allow Your Wife to Dress in a Miniskirt to the Party"? : Batterers Do Not Activate Default Mode Network During Moral Decisions About Intimate Partner Violence. *Journal of Interpersonal Violence*, *37*(3-4), NP1463-NP1488. https://doi.org/10.1177/0886260520926494

Marques, J. P., Kober, T., Krueger, G., Van Der Zwaag, W., Van De Moortele, P.-F., & Gruetter, R. (2010). MP2RAGE, a self bias-field corrected sequence for improved segmentation and T1-mapping at high field. *NeuroImage*, *49*(2), 1271-1281. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.002

Martinko, M. J., & Gardner, W. L. (1982). Learned Helplessness : An Alternative Explanation for Performance Deficits. *The Academy of Management Review*, *7*(2), 195. https://doi.org/10.2307/257297

McDougall, W. (1932). *Of the words character and personality*.

Meine, L. E., Schüler, K., Richter-Levin, G., Scholz, V., & Wessa, M. (2020). A Translational Paradigm to Study the Effects of Uncontrollable Stress in Humans.

International Journal of Molecular Sciences, *21*(17), 6010. https://doi.org/10.3390/ijms21176010

Metalsky, G. I., Abramson, L. Y., Seligman, M. E. P., Semmel, A., & Peterson, C. (1982). Attributional styles and life events in the classroom : Vulnerability and invulnerability to depressive mood reactions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *43*(3), 612-617. https://doi.org/10.1037/0022-3514.43.3.612

Molnar-Szakacs, I., & Uddin, L. Q. (2013). Self-Processing and the Default Mode Network : Interactions with the Mirror Neuron System. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00571

Patterson, T. K., & Knowlton, B. J. (2018). Subregional specificity in human striatal habit learning : A meta-analytic review of the fMRI literature. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *20*, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.10.005

Paul, S. J. (2020). It's All in Your Mind : The Psychology of Rehearsal. In S. J. Paul, *Art & Science in the Choral Rehearsal* (p. 141-156). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780190863760.003.0007

Pearson, J. (2019). The human imagination : The cognitive neuroscience of visual mental imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(10), 624-634. https://doi.org/10.1038/s41583-019-0202-9

Plaisant, O., Guertault, J., Courtois, R., Réveillère, C., Mendelsohn, G. A., & John, O. P. (2010). Histoire des « Big Five » : OCEAN des cinq grands facteurs de la personnalité. Introduction du Big Five Inventory français ou BFI-Fr. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, *168*(7), 481-486. https://doi.org/10.1016/j.amp.2009.04.016

Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(2), 676-682. https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676

Raz, N., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Gunning-Dixon, F., & Acker, J. D. (2003). *Differential Aging of the Human Striatum : Longitudinal Evidence*.

Satpute, A. B., & Lindquist, K. A. (2019). The Default Mode Network's Role in Discrete Emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*(10), 851-864. https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.07.003

Schmidt, N. B., Richey, J. A., Zvolensky, M. J., & Maner, J. K. (2008). Exploring human freeze responses to a threat stressor. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, *39*(3), 292-304. https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2007.08.002

Sha, Z., Wager, T. D., Mechelli, A., & He, Y. (2019). Common Dysfunction of Large-Scale Neurocognitive Networks Across Psychiatric Disorders. *Biological Psychiatry*, *85*(5), 379-388. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.11.011

Shulman, G. L., Fiez, J. A., Corbetta, M., Buckner, R. L., Miezin, F. M., Raichle, M. E., & Petersen, S. E. (1997). Common Blood Flow Changes across Visual Tasks : II. Decreases in Cerebral Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*(5), 648-663. https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.5.648

Singh, K., Cauzzo, S., García-Gomar, M. G., Stauder, M., Vanello, N., Passino, C., & Bianciardi, M. (2022). Functional connectome of arousal and motor brainstem nuclei in living humans by 7 Tesla resting-state fMRI. *NeuroImage*, *249*, 118865. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118865

Sinitsyn, D. O., Bakulin, I. S., Poydasheva, A. G., Legostaeva, L. A., Kremneva, E. I., Lagoda, D. Yu., Chernyavskiy, A. Yu., Medyntsev, A. A., Suponeva, N. A., & Piradov, M. A. (2020). Brain Activations and Functional Connectivity Patterns Associated with Insight-Based and Analytical Anagram Solving. *Behavioral Sciences*, *10*(11), 170. https://doi.org/10.3390/bs10110170

Smith, S. M. (2002). Fast robust automated brain extraction. *Human Brain Mapping*, *17*(3), 143-155. https://doi.org/10.1002/hbm.10062

Smith, S. M., Jenkinson, M., Woolrich, M. W., Beckmann, C. F., Behrens, T. E. J., Johansen-Berg, H., Bannister, P. R., De Luca, M., Drobnjak, I., Flitney, D. E., Niazy, R. K., Saunders, J., Vickers, J., Zhang, Y., De Stefano, N., Brady, J. M., & Matthews, P. M. (2004). Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. *NeuroImage*, *23*, S208-S219. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.07.051

Smith, V., Duncan, J., & Mitchell, D. J. (2021). Roles of the Default Mode and Multiple-Demand Networks in Naturalistic versus Symbolic Decisions. *The Journal of Neuroscience*, *41*(10), 2214-2228. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1888-20.2020

Tayfur, Ö., & Arslan, M. (2012). *The Alleviating Effect of Perceived Supervisor Support on Workload, Work-Family Conflict & Learned Helplessness*.

Taylor, J. J., Neitzke, D. J., Khouri, G., Borckardt, J. J., Acierno, R., Tuerk, P. W., Schmidt, M., & George, M. S. (2014). A pilot study to investigate the induction and manipulation of learned helplessness in healthy adults. *Psychiatry Research*, *219*(3), 631-637. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2014.05.045

Thacker, R. A. (1992). A descriptive study of behavioral responses of sexual harassment targets : Implications for control theory. *Employee Responsibilities and Rights Journal*, *5*(2), 155-171. https://doi.org/10.1007/BF01384734

Tubre, T. C., & Collins, J. M. (2000). Jackson and Schuler (1985) Revisited : A Meta-Analysis of the Relationships Between Role Ambiguity, Role Conflict, and Job Performance. *Journal of Management*, *26*(1), 155-169. https://doi.org/10.1177/014920630002600104

Valås, H. (2001). Learned Helplessness and Psychological Adjustment II : Effects of learning disabilities and low achievement. *Scandinavian Journal of Educational Research*, *45*(2), 101-114. https://doi.org/10.1080/00313830120052705

Van Der Kolk, B. A. (1998). Trauma and memory : Trauma and memory. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *52*(S1), S57-S69. https://doi.org/10.1046/j.1440-1819.1998.0520s5S97.x

Van Der Linden, D., Te Nijenhuis, J., & Bakker, A. B. (2010). The General Factor of Personality : A meta-analysis of Big Five intercorrelations and a criterion-related

validity study. *Journal of Research in Personality*, *44*(3), 315-327. https://doi.org/10.1016/j.jrp.2010.03.003

Van Rooij, S. J. H., Kennis, M., Sjouwerman, R., Van Den Heuvel, M. P., Kahn, R. S., & Geuze, E. (2015). Smaller hippocampal volume as a vulnerability factor for the persistence of post-traumatic stress disorder. *Psychological Medicine*, *45*(13), 2737-2746. https://doi.org/10.1017/S0033291715000707

Varela, J. A., Wang, J., Christianson, J. P., Maier, S. F., & Cooper, D. C. (2012). Control over Stress, But Not Stress Per Se Increases Prefrontal Cortical Pyramidal Neuron Excitability. *The Journal of Neuroscience*, *32*(37), 12848-12853. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2669-12.2012

Vatansever, D., Menon, D. K., & Stamatakis, E. A. (2017). Default mode contributions to automated information processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(48), 12821-12826. https://doi.org/10.1073/pnas.1710521114

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., Van Der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., … Vázquez-Baeza, Y. (2020). SciPy 1.0 : Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, *17*(3), 261-272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2

Wade-Bohleber, L. M., Haugg, A., Huber, S., Ernst, J., Grimm, S., Recher, D., Richter, A., Seifritz, E., Boeker, H., & Northoff, G. (2021). Anticipating control over aversive stimuli is mediated by the medial prefrontal cortex : An FMRI study with healthy adults. *Human Brain Mapping*, *42*(13), 4327-4335. https://doi.org/10.1002/hbm.25549

Will, M. J., Der-Avakian, A., Bland, S. T., Grahn, R. E., Hammack, S. E., Sparks, P. D., Pepin, J. L., Watkins, L. R., & Maier, S. F. (2004). Electrolytic lesions and pharmacological inhibition of the dorsal raphe nucleus prevent stressor potentiation of morphine conditioned place preference in rats. *Psychopharmacology*, *171*(2), 191-198. https://doi.org/10.1007/s00213-003-1572-1

Woo, C.-W., Krishnan, A., & Wager, T. D. (2014). Cluster-extent based thresholding in fMRI analyses : Pitfalls and recommendations. *NeuroImage*, *91*, 412-419. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.058

Woolrich, M. W., Behrens, T. E. J., Beckmann, C. F., Jenkinson, M., & Smith, S. M. (2004a). Multilevel linear modelling for FMRI group analysis using Bayesian inference. *NeuroImage*, *21*(4), 1732-1747. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.023

Woolrich, M. W., Behrens, T. E. J., Beckmann, C. F., Jenkinson, M., & Smith, S. M. (2004b). Multilevel linear modelling for FMRI group analysis using Bayesian inference. *NeuroImage*, *21*(4), 1732-1747. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.023

Yang, X.-F., Bossmann, J., Schiffhauer, B., Jordan, M., & Immordino-Yang, M. H. (2013). Intrinsic Default Mode Network Connectivity Predicts Spontaneous Verbal Descriptions of Autobiographical Memories during Social Processing. *Frontiers in Psychology*, *3*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00592

Yeung, A. W. K. (2018). An Updated Survey on Statistical Thresholding and Sample Size of fMRI Studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 16. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00016

Yu, R., Mobbs, D., Seymour, B., Rowe, J. B., & Calder, A. J. (2014). The neural signature of escalating frustration in humans. *Cortex*, *54*, 165-178. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.02.013

Zhou, H.-X., Chen, X., Shen, Y.-Q., Li, L., Chen, N.-X., Zhu, Z.-C., Castellanos, F. X., & Yan, C.-G. (2020). Rumination and the default mode network : Meta-analysis of brain imaging studies and implications for depression. *NeuroImage*, *206*, 116287. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116287

ANNEXE A : ANALYSE DES PRE-DONNÉES DES TESTS D'ANAGRAMMES

```
import csv
import unidecode

TailleL_Info = 5
ListeRep = [["CHINE","CHENI","CHIEN"],["CRIME"],["AUBE"],
        ["APERO","PAREO"],["SANTE","ANTES","ENTAS","NESTA","SEANT"],["CHARME","MACHER"],
        ["GERA","RAGE","GREA"],["AMIS","MISA","SAMI","SIMA"],["CERTES","CRETES","TERCES"],
        ["PUREMENT"],["BARRE"],["ESPOIR","PROIES"],
        ["RIDES","REDIS"],["SILENCE"],["IMAGINER"],
        ["LOUPE"],["IMAGE"],["GUIDE"],
        ["PERSO","PROSE","POSER","PORES","REPOS","PSORE"],["PIGEON"],

["MENAGE","ENGAME","MAGNEE","MANGEE"],["GOYAVE"],["NATIVE","VEINAT","VENAIT","ENVIAT
"],

["CENTRE","CREENT","TENREC"],["EROS","ORES","ROSE","SORE"],["PEUR","PUER","PRUE","REPU"],
        ["MONDE"],["DEITE","EDITE","TIEDE"],["PEINE","PINEE"],
        ["INTRA","RIANT","TARIN","TRINA"]
        ]
ListeQuesti = ["NICHE","MERCI","BEAU",
          "OPERA","SENAT","MARCHE",
          "GARE","MAIS","SECRET",
          "EMPRUNTE","ARBRE","POIRES",
          "DESIR","ENCLISE","MIGRAINE",
          "POULE","MAGIE","DIGUE",
          "SPORE","POIGNE","MANEGE",
          "VOYAGE","VANITE","RECENT",
          "OSER","PURE","DEMON",
          "DIETE", "EPINE","TRAIN"]

Chemin = "/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Reponse_Anagramme_labac/survey.user_input.csv"

fichier = open(Chemin,"r")
cr = csv.reader(fichier, delimiter = ",")

Header = []
Header = next(cr)

rows =[]

for row in cr :
   rows.append(row)
Participants = []

for i in range(12):

   Participants.append([])
   Participants[i].append(rows[35*i][11])
   Participants[i].append(rows[35 * i+1][11])


Temps = []

for k in range(30):
```

```
    Temps.append([])

    for i in range(12):
        if unidecode.unidecode(rows[5+k+35*i][11].upper()).replace(" ","") in ListeRep[k]:
            ch1 = rows[4+k+35*i][10]
            ch2 = rows[5+k+35*i][10]
            t2 = int(ch2[14:].split(":")[0])*60+int(ch2[14:].split(":")[1])
            t1 = int(ch1[14:].split(":")[0])*60+int(ch1[14:].split(":")[1])
            Temps[k].append(t2 - t1)
        else :
            Temps[k].append(False)



import statistics

TempsMoyen = []
Liste_nb_false = []

for i in range(30):
    m = 0
    k = 0
    nbfalse = 0
    for j in range(12):
        if Temps[i][j] != 0:
            m = m + Temps[i][j]
            k = k + 1
        else:
            nbfalse = nbfalse + 1
    if k == 0 :
        k = 1

    TempsMoyen.append(m/k)
    Liste_nb_false.append(nbfalse)




def triListe(TempsMoyen,ListeQuesti):
    TmoyCopy = TempsMoyen.copy()
    ListeQuestiCopy = ListeQuesti.copy()
    Liste_nb_falseCopy = Liste_nb_false.copy()

    for i in range(1,len(TempsMoyen)):
        for j in range(0,i):
            if TmoyCopy[i] < TmoyCopy[j] :
                TmoyCopy.insert(j,TmoyCopy[i])
                ListeQuestiCopy.insert(j, ListeQuestiCopy[i])
                Liste_nb_falseCopy.insert(j, Liste_nb_falseCopy[i])
                del TmoyCopy[i+1]
                del ListeQuestiCopy[i + 1]
                del Liste_nb_falseCopy[i + 1]
                break
    return TmoyCopy,ListeQuestiCopy,Liste_nb_falseCopy

TmoyCopy,ListeQuestiCopy, Liste_nb_falseCopy= triListe(TempsMoyen,ListeQuesti)
```

```
for i in range(len(TmoyCopy)):
    print(str(ListeQuestiCopy[i]) + " : " + str(TmoyCopy[i]) + " et nombre de bonne réponse : " + str((1-
Liste_nb_falseCopy[i]/12)*100)+ "%")


TempsReflexionEstime =[]
```

ANNEXE B : CODE POUR L'AFFICHAGE DE LA FIGURE 3.1

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
#Produit de convolution

#Fonction stimulus

Stimulus_event = [[2,3],[6,1],[8,2]] #Commence à 2s et dure 3s


def Stim(t,A):
    Stimu_1 = []
    T = 0

    for i in range(A[0][0]):
        Stimu_1.append(0)
        T = T + 1

    for i in range(A[0][1]):
        Stimu_1.append(1)
        T = T + 1

    for i in range (1,len(A)):

        for k in range(A[i][0]-T):
            Stimu_1.append(0)
        T = A[i][0]

        for k in range(A[i][1]):
            Stimu_1.append(1)
            T = T + 1
    t_entier = int(t)
    if A[0][0] < t < A[-1][0] :
        return Stimu_1[t_entier]
    else :
        return 0

#Fonction HRF
from scipy.stats import gamma
def hrf(times):
    """ Return values for HRF at given times """
    # Gamma pdf for the peak
    peak_values = gamma.pdf(times, 6)
    # Gamma pdf for the undershoot
    undershoot_values = gamma.pdf(times, 12)
    # Combine them
    values = peak_values - 0.35 * undershoot_values
    # Scale max to 0.6
    return values / np.max(values) * 0.6

x = np.arange(0, 10, 0.1)

Stimu_x = []
for i in range (len(x)):
    Stimu_x.append(Stim(x[i],Stimulus_event))
```

```
Stimu_x = np.array(Stimu_x)

print(len(Stimu_x))

TR = 1 # ce TR est fictif et ne sert qu'à illustrer l'idée derrière le GLM
tr_times = np.arange(0, 30, TR)
hrf_at_trs = hrf(tr_times)

n_to_remove = len(hrf_at_trs) - 1



convolved = np.convolve(Stimu_x, hrf_at_trs)
convolved = convolved[:-n_to_remove]

#convolved = np.array(convolved[:100])

plt.plot(x,convolved)
plt.plot(x,Stimu_x)
plt.show()
```

ANNEXE C : CODE DE L'AFFICHEUR DANS L'IRM

```
from tkinter import Label, Tk
import time
import os
import datetime

ListeAnagram = [["DEMON", "POULE", "GARE"],
                ["PURE", "OPERA", "BEAU"],
                ["DIETE", "DIGUE", "RECENT"],
                ["SPORE", "MARCHE", "DESIR"],
                ["OSER", "MAIS", "SECRET"]]

ListeRate = [[" DEMON : 92% ", " POULE : 90% ", " GARE : 83% "],
             [" PURE : 67% ", " OPERA : 75% ", "BEAU : 97% "],
             ["DIETE : 95% ", "DIGUE : 78% ", "RECENT : 75% "],
             ["SPORE : 67% ", "MARCHE : 70% ", "DESIR : 60% "],
             ["OSER : 92% ", "MAIS : 93% ", "SECRET : 60%"]
             ]


app_window = Tk()
app_window.title("Anagramme")
app_window.attributes('-fullscreen', True)

Time = time.time()

Repertoire = "/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/AfficheurAnagramme/sub-"
n = 1
Daydate = datetime.date.today()

while os.path.exists(Repertoire + str(n) + "-(" + str(Daydate) + ").txt"):
    n = n + 1

fichier = open(Repertoire + str(n) + "-(" + str(Daydate) + ").txt", "x")
fichier.write("Temps(s)" + "    " + "Event" + "    " + "WordDisplay" + "\n")



class Texte:
    def __init__(self, fichier, Time):

        self.fichier = fichier
        self.Time = Time
        self.enterbool = False
        self.t_enterbool = None
        self.t_suivi = 0
        # Liste des temps où l'experimentateur fait le suivi des réponses aux anagrammes avec le participant
        self.list_t_suivi = []

        self.list_TR = [0]
        self.TR_bool = False
        text_font = ("Boulder", 100, 'bold')
        background = "#FFFFFF"
        foreground = "#000000"
        self.label = Label(font=text_font, bg=background, fg=foreground)
```

```
        self.label1 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")
        self.label2 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")
        self.label3 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")


        # condition d'entrée vers nouvel affichage pour synchro des débuts d'affichage
        self.bool_seq_etoile = 0
        self.bool_seq_Ana = 0
        self.bool_seq_Answer = 0
        self.bool_seq_Percentage = 0

    def affichage(self):



        # Temps d'arrière plan
        t = time.time() - self.Time

        if t - self.list_TR[-1] > 3 and self.TR_bool == False:
            self.TR_bool = True
            fichier.write(str(t) + "    "+ "entrée Attente TR"+ "\n")

        # Temps permettant de piloter les séquences
        # Affichage en pause si l'IRM ne réalise plus l'acquisition
        if not self.enterbool and (not self.TR_bool or 4 <= self.t_enterbool % 89 < 89):
            self.t_enterbool = t - sum(self.list_t_suivi)


        seq = int(self.t_enterbool // 89)
        app_window.bind('<KeyPress>', lambda event: self.frappesaver(event, t, self.t_enterbool, self.fichier))
        app_window.bind('<Escape>', lambda escape: self.close(escape))
        app_window.bind('<Return>', lambda enter: self.suivireponse(enter, t))

        if self.enterbool:
            self.bool_seq_Ana = 0
            self.bool_seq_etoile = 0
            self.bool_seq_Percentage = 0
            if not(self.bool_seq_Answer) :
                fichier.write(str(t) + "    " + "phase entre pressed" + "    " + "Res" + "\n")
                self.bool_seq_Answer = 1
            self.label.config(text="")
            self.label.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")
            self.label.after(50, self.affichage)

        elif 4 <= self.t_enterbool % 89 < 64 and not self.enterbool:
            self.bool_seq_etoile = 0
            self.bool_seq_Answer = 0
            self.bool_seq_Percentage = 0
            if not (self.bool_seq_Ana):
                fichier.write(str(t) + "    " + "event start" + "    " + ListeAnagram[seq][int(self.t_enterbool % 89 - 4) // 20] +
"\n")
                self.bool_seq_Ana = 1

            self.label.config(text=ListeAnagram[seq][int(self.t_enterbool % 89 - 4) // 20])
            self.label.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")
            self.label.after(50, self.affichage)
```

```
    elif 64 <= self.t_enterbool % 89 < 79 and not self.enterbool:
        self.bool_seq_etoile = 0
        self.bool_seq_Ana = 0
        self.bool_seq_Percentage = 0
        if not (self.bool_seq_Answer):
            fichier.write(str(t) + "    " + "réponse start" + "    " + "Res" + "\n")
            self.bool_seq_Answer = 1
        self.label.config(text="")
        self.label.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")
        self.label.after(50, self.affichage)

    elif 79 <= self.t_enterbool % 89 < 89 and not self.enterbool:

        self.bool_seq_etoile = 0
        self.bool_seq_Ana = 0
        self.bool_seq_Answer = 0
        if not (self.bool_seq_Percentage):
            fichier.write(str(t) + "    " + "percentage start" + "    " + "Percentage" + "\n")
            self.bool_seq_Percentage = 1

        self.label1.config(text=ListeRate[seq][0])
        self.label1.place(relx=0.5, rely=0.3, anchor="center")
        self.label2.config(text=ListeRate[seq][1])
        self.label2.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")
        self.label3.config(text=ListeRate[seq][2])
        self.label3.place(relx=0.5, rely=0.7, anchor="center")
        self.label1.after(50, self.affichage)

    elif 0 <= self.t_enterbool % 89 < 4 and not self.enterbool:

        self.bool_seq_Percentage = 0
        self.bool_seq_Ana = 0
        self.bool_seq_Answer = 0
        if not (self.bool_seq_etoile):
            fichier.write(str(t) + "    " + "* start" + "    " + "*" + "\n")
            self.bool_seq_etoile = 1
        self.label.config(text="*")

        self.label.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")

        self.label1.destroy()
        self.label2.destroy()
        self.label3.destroy()

        self.label1 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")
        self.label2 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")
        self.label3 = Label(font=("Boulder", 67, 'bold'), bg="#FFFFFF", fg="#000000")

        self.label.after(50, self.affichage)
    elif self.t_enterbool > 445:
        fichier.close()

def frappesaver(self, event, t, t_enterbool, fichier):
    if event.char == "T":
        self.list_TR.append(t)
```

```
            if self.TR_bool == True and t_enterbool % 89 < 4 :
                self.list_t_suivi.append(t - t_enterbool - sum(self.list_t_suivi))
                self.TR_bool = False
                fichier.write(str(t) + "    "+"sortie Attente TR"+ "\n")


        if 4 < int(t_enterbool % 89) < 64:
            fichier.write(str(t) + "    " + event.char + "    " + ListeAnagram[int(t_enterbool // 89)][
                int(t_enterbool % 89 - 4) // 20] + "\n")
        elif 64 <= int(t_enterbool % 89) < 79:
            fichier.write(str(t) + "    " + event.char + "    " + "/""/" + "\n")
        elif 79 <= int(t_enterbool % 89) < 89 or int(t_enterbool % 89) < 4:
            fichier.write(str(t) + "    " + event.char + "    " + "Res" + "\n")

        self.affichage()

    def suivireponse(self, enter, t):
        if not self.enterbool:
            fichier.write(str(t) + "    " + "entrée Attente espace"+ "\n")
            self.list_t_suivi.append(time.time() - self.Time)
        elif self.enterbool:
            fichier.write(str(t) + "    " + "sortie Attente espace"+ "\n")
            self.list_t_suivi[-1] = time.time() - self.Time - self.list_t_suivi[-1]

        self.enterbool = not self.enterbool
        fichier.write(str(t) + "    " + "enter" + "    " + "Answer_moment" + "\n")
        self.affichage()

    def close(self, escape):
        print(escape.char)
        fichier.close()
        app_window.destroy()


Texteaff = Texte(fichier, Time)

Texteaff.affichage()
app_window.mainloop()
```

Afin d'utiliser ce code, faites attention à la modification du chemin où le fichier texte est enregistré. De plus, une fois que le code est lancé, il est normal qu'une étoile reste indéfiniment affichée à l'écran puisque cet afficheur est en pause tant qu'il ne reçoit pas l'entrée clavier « T » en majuscule. Ainsi, une fois que cette entrée a été frappée, l'affichage de la première séquence commence.

ANNEXE D : CODE DU TRAITEMENT DES DONNÉES : SIGNAL ÉLECTRODERMAL

```
#Load the NeuroKit package
import neurokit2 as nk
#import os
#import csv
import time
import numpy as np
import seaborn as sn
from matplotlib import pyplot as plt
#from itertools import chain
import pandas as pd
import seaborn as sns
#bash : accès au bon dossier:  cd ../../ personnal_PATH /Projet\ Recherche\ Maîtrise/Analyse_signal_EDA

#Sujet d'étude
global subject_n
subject_n = "ImpAcq_01"

#Nombre de volume par sujet
global number_volumes
if subject_n == "ImpAcq_01":
   number_volumes= 20
else :
   number_volumes = 22


#Chemin d'accès vers le dossier où sont stockées les données pour chaque participants aux formats (ImpAcq_01 ... ImpAcq_20)

global path_acces_data
path_access_data = "/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/"

#Lien d'accès aux fichiers :
global path_fichier_txt_eda_trig
path_fichier_txt_eda_trig = path_access_data+ subject_n +"/"+ subject_n +"_eda_trig.csv"
# "/Personnal_path/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/ImpAcq_01/eda_signal.txt"
global path_saved_eda
path_saved_eda =path_access_data+ subject_n +"/eda_signal.txt"

#"/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/ImpAcq_01/trigger_signal.txt"
global path_saved_trig
path_saved_trig = path_access_data+ subject_n +"/trigger_signal.txt"



# Seq_1 = trigger_signal[13050000:13700000] , eda_signal[13050000:13700000]
# Seq_resolution = []



class Seance:
   def __init__(self):
      self.path_fichier_txt_eda_trig = path_fichier_txt_eda_trig
```

```
def save_txt2array(self):
    self.file = open(self.path_fichier_txt_eda_trig, 'r') #Warning ImpAcq_01 saved en txt avec délimiteur espace
    self.eda_signal = []
    self.trigger_signal = []
    for line in self.file:
        self.trigger_signal.append(float(line.split("\t")[0]))
        self.eda_signal.append(float(line.split("\t")[1]))
    self.eda_signal = np.array(self.eda_signal)
    self.trigger_signal = np.array(self.trigger_signal)
    np.savetxt(path_saved_eda,self.eda_signal)
    np.savetxt(path_saved_trig,self.trigger_signal)

def load_array(self):
    self.eda_signal = np.loadtxt(path_saved_eda)
    self.trigger_signal = np.loadtxt(path_saved_trig)


def identification_seq(self):
    self.L_seq_trigger = [[]]
    self.L_seq_eda = [[]]
    k = 0
    p = 0
    for i in range(1, len(self.trigger_signal)):

        if 3 < self.trigger_signal[i] < 6 and not (3 < self.trigger_signal[i - 1] < 6):
            m = i

            #Récupération des données avant le début de séquence afin d'observe
            # if k == 0 and p == 0:
            #     self.L_seq_trigger[k] = list(self.trigger_signal[m-1])
            #
            #     self.L_seq_eda[k]= list(self.eda_signal[m-1])

            while 3 < self.trigger_signal[m] < 6 and m < len(self.trigger_signal):
                self.L_seq_trigger[k].append(self.trigger_signal[m])
                self.L_seq_eda[k].append(self.eda_signal[m])

                m = m + 1
            while not (3 < self.trigger_signal[m] < 6) and m-i < 30000 and m < len(self.trigger_signal):
                self.L_seq_trigger[k].append(self.trigger_signal[m])
                self.L_seq_eda[k].append(self.eda_signal[m])
                m = m + 1

            p = p + 1
            print( "p =", p)
            print("k =", k)
        if p == number_volumes and k<6:
            self.L_seq_trigger.append([])
            self.L_seq_eda.append([])
            k = k + 1
            p = 0

def save_seq(self):
    for i in range(6):
        np.savetxt(path_access_data+ subject_n +"/eda_signal_seq"+str(i)+".txt",self.L_seq_eda[i])
```

```
        for i in range(6):
            np.savetxt(path_access_data+ subject_n +"/trigger_signal_seq"+str(i)+".txt", self.L_seq_trigger[i])

    def load_seq(self):
        self.L_seq_trigger = [[]]*6
        self.L_seq_eda = [[]] * 6
        for i in range(6):
            self.L_seq_trigger[i] = np.loadtxt(path_access_data+ subject_n +"/trigger_signal_seq"+str(i)+".txt")
        for i in range(6):
            self.L_seq_eda[i] = np.loadtxt(path_access_data+ subject_n +"/eda_signal_seq"+str(i)+".txt")

    def frequ_ech(self): #Méthode qui était pertinente au début (oubli de la fréquence d'échantillonage), qui ne l'est plus
        trig_max = []
        n_trig_max = []

        for i in range(len(self.trigger_signal)):
            if 2 < self.trigger_signal[i] < 8:
                trig_max.append(self.trigger_signal[i])
                n_trig_max.append(i)

        ecart_n_trig_max = []
        for i in range(1, len(n_trig_max)):
            ecart_n_trig_max.append(n_trig_max[i] - n_trig_max[i - 1])
    def synchro(self):
        #Liste indice des trigger captés par le biopac
        self.i_trig = [0,1]
        for i in range(1,len(self.trigger_signal)):
            if self.trigger_signal[i] > 3:
                self.i_trig.append(i)
        del self.i_trig[0]
        del self.i_trig[0]
        liste_indice = []
        for j in range(len(self.i_trig) - 1):
            if self.i_trig[j] == self.i_trig[j + 1] - 1:
                liste_indice.append(j + 1)
        for j in range(len(liste_indice)):
            liste_indice[j] = liste_indice[j] - len(liste_indice[0:j])
        for j in range(len(liste_indice)):
            del self.i_trig[liste_indice[j]]
        np.savetxt(path_access_data+ subject_n +"/i_trig.txt",self.i_trig)

        #print("3*")
        #Ouverture du fichier de synchronisation
        df = pd.read_csv(path_access_data+ subject_n +"/"+ subject_n +"_press_file.csv",sep=";",header=0) # Warning séparateur peut changer ainsi que le type du fichier
        #Liste des temps à laquelle sont captés les TR
        self.List_time_TR =[]
        for i in range(len(df["Temps(s)"])):
            if df["Event"][i] == "T":
                self.List_time_TR.append(df["Temps(s)"][i])
        #Warning : étape particulière à au sujet numéro 1 : branchement usb du signal trigger tardif => capture de 11 trigger fictif qui n'existe pas dans le fichier texte du sub-01
        # for i in range(11):
        #     del self.List_time_TR[0]
```

```
        for i in range(len(self.List_time_TR)):
            self.List_time_TR[i] = self.List_time_TR[i] #Temps du début d'aquisition IRMf
        #division des temps TR en chaque séquence
        self.list_seq_time_TR = []
        #print("4*")
        for i in range(5):
            self.list_seq_time_TR.append([])
            for j in range(number_volumes):
                self.list_seq_time_TR[i].append(self.List_time_TR[number_volumes*i+j])

        #Identification du premier temps TR selon la séquence (car première séquence, enregistrement de multiple entrée clavier "T" sans volume associé)
        if subject_n != "ImpAcq_01":
            for i in range(len(df["Event"])):
                if df["Event"][i] == "T":
                    First_T_time = df["Temps(s)"][i]
                    break
        else:
            First_T_time = 84.77945685386658

        # Liste des 1er TR de chaque début de séquence
        self.list_time_start_seq = [First_T_time] #Temps à laquelle est présenté le premier stimulus
#t_1st_event_ImpAcq_01 = 84.77945685386658
        for i in range(len(df["Event"])):
            if df["Event"][i] == "T" and df["WordDisplay"][i] == "Res" and df["Temps(s)"][i] > self.list_time_start_seq[-1] + 4:
                self.list_time_start_seq.append(df["Temps(s)"][i] + 4)

        self.list_time_display =[]
        for i in range(len(self.list_time_start_seq)):
            self.list_time_display.append(self.list_time_start_seq[i])
            self.list_time_display.append(self.list_time_start_seq[i] + 20)
            self.list_time_display.append(self.list_time_start_seq[i] + 40)
        #print(4)
        #Ajout du début de la séquence RS


        # Création liste des temps synchro avec chaque séquence EDA
        list_seq_temps_sync = []
        for i in range(5):
            list_seq_temps_sync.append(np.linspace(self.list_seq_time_TR[i][0],
                                       self.list_seq_time_TR[i][number_volumes - 1] + 3,
                                       len(self.L_seq_eda[i])
                                       ))

        #liste des temps ou le bouton est pressé
        self.list_press_d_time = []
        for i in range(len(df["Event"])):
            if df["Event"][i] == "d" : #2eme éléments de la condition qui ne fonctionne que pour le 1st subject (and df["Temps(s)"][i] > 88)
                self.list_press_d_time.append(df["Temps(s)"][i])

        #Booléen si le ieme event a reçu une reponse (pression sur le bouton "d")
        self.rep_bool = []
        k = 0
        for i in range(len(self.list_time_display) - 1):
```

```
            if k < len(self.list_press_d_time) and (self.list_press_d_time[k] > self.list_time_display[i]) and
(self.list_press_d_time[k] < self.list_time_display[i] + 20):
                self.rep_bool.append(True)
                k = k + 1
            else:
                self.rep_bool.append(False)
        if self.list_time_display[-1] < self.list_press_d_time[-1]:
            self.rep_bool.append(True)
        else:
            self.rep_bool.append(False)


        # Bouton pressé séparé en séquence
        k = 0
        self.list_seq_press_d_time = []
        for i in range(5):
            self.list_seq_press_d_time.append([])
            for j in range(3):
                if self.rep_bool[i * 3 + j]:
                    self.list_seq_press_d_time[i].append(self.list_press_d_time[k])
                    k = k + 1


        # linspace du temps du 1er TR à la fin de la liste en temps (s)
        self.List_synchro_time = np.linspace(self.List_time_TR[0], self.List_time_TR[0] +
                                             (self.List_time_TR[1] - self.List_time_TR[0]) /
                                             (self.i_trig[1] - self.i_trig[0])
                                             * (len(self.eda_signal) - self.i_trig[0]),
                                             len(self.eda_signal) - self.i_trig[0])
        #Liste de temps synchronisé avec chacune des séquences finissant 3 sc après le dernier TR
        self.list_seq_temps_sync = []
        for i in range(5):
            self.list_seq_temps_sync.append(np.linspace(self.list_seq_time_TR[i][0],
                                            self.list_seq_time_TR[i][number_volumes - 1] + 3,
                                            len(self.L_seq_eda[i])
                                            ))
        self.list_time_start_seq_true = []
        for i in range(5):
            self.list_time_start_seq_true.append([])
            for j in range(3):
                if self.rep_bool[i * 3 + j]:
                    self.list_time_start_seq_true[i].append(self.list_time_display[i * 3 + j])
        self.list_i_time_start_seq_true = []
        for i in range(5):
            self.list_i_time_start_seq_true.append([])
            for j in range(len(self.list_time_start_seq_true[i])):
                self.list_i_time_start_seq_true[i].append(
                    (self.list_time_start_seq_true[i][j] - self.list_time_start_seq[i]) * 10000)

    def preproc_eda(self):
        self.phasic_signal_seq = []
        for i in range(5):
            signals, info = nk.eda_process(self.L_seq_eda[i], sampling_rate=10000)
            self.phasic_signal_seq.append(signals["EDA_Phasic"].values.tolist())
```

```
    def plot_seq_n(self,n,signal_type): #Plot la n iéme séquence du sujet chargé au début du code
        signals, info = nk.eda_process(self.L_seq_eda[n], sampling_rate=10000)
        plt.plot(self.list_seq_temps_sync[n], signals[signal_type])
        plt.title('Signal EDA -' + " séquence n°" + str(n+1), fontsize=15)
        plt.xlabel('Temps [s]')
        plt.ylabel('Intensité')
        for i in range(len(self.list_seq_press_d_time[n])):
            plt.axvline(x=self.list_seq_press_d_time[n][i], color='r')
            plt.text(self.list_seq_press_d_time[n][i] - 3, max(signals[signal_type]), "Press " + str(i + 1),
                     bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='red', pad=5.0
                               ))
        for i in range(3):
            plt.axvline(x=self.list_time_display[i + 3 * n], color='b')
            plt.text(self.list_time_display[n * 3 + i] - 3, min(signals[signal_type]), "Event " + str(i + 1),
                     bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='blue', pad=5.0
                               ))

    def boxplot_seq_sub_n(self):
        #Sont séparés (ppur idnetification) les intensités du signal phasique au sein de chaque séquence entre la phase de réflexion et la phase de non-réflexion
        self.seq_eda_IsThinking = []
        self.seq_eda_NotThinking = []
        #Même chose pour les peaks, heights des peaks et leurs amplitudes
        seq_bool_scr_peaks_Isth = []
        seq_bool_scr_peaks_Noth = []
        seq_scr_amplitude_Isth = []
        seq_scr_amplitude_Noth = []
        seq_scr_Height_Isth = []
        seq_scr_Height_Noth = []
        seq_number_peak_Isth = []
        seq_number_peak_Noth = []

        for seq in range(5):
            # Création liste des positions des event dans les epochs
            n_event_position = [(int(self.list_time_display[3 * seq] - self.list_seq_temps_sync[seq][0]) * 10000),
                                int((self.list_time_display[1 + 3 * seq] - self.list_seq_temps_sync[seq][0]) * 10000),
                                int((self.list_time_display[2 + 3 * seq] - self.list_seq_temps_sync[seq][0]) * 10000)]
            n_press_position = []
            for i in range(len(self.list_seq_press_d_time[seq])):
                n_press_position.append(int((self.list_seq_press_d_time[seq][i] - self.list_seq_temps_sync[seq][0]) * 10000))

            # Création de l'array avec signal dans A = "Is thinking to a solution" ou dans !A pour fit avec seaborn (création de boîte)
            signals, info = nk.eda_process(self.L_seq_eda[seq], sampling_rate=10000)

            #Enregistrement des différentes données d'intérêts
            L_signals = signals["EDA_Phasic"].values.tolist()
            L_bool_scr_peaks = signals['SCR_Peaks'].values.tolist()
            L_scr_amplitude = signals['SCR_Amplitude'].values.tolist()
            L_scr_SCR_Height = signals['SCR_Height'].values.tolist()

            #Liste dans lesquelles les différentes séquences des signaux sont enregistrées
            seq_eda_IsThinking_n = []
            seq_eda_NotThinking_n = []
            seq_bool_scr_peaks_Isth_n = []
```

```
        seq_bool_scr_peaks_Noth_n = []
        seq_scr_amplitude_Isth_n = []
        seq_scr_amplitude_Noth_n = []
        seq_scr_Height_Isth_n = []
        seq_scr_Height_Noth_n = []

        n_False = 0 #Evite les erreurs d'incréments dues à l'absence de réponses à l'event et donc l'absence dans la liste n_press_position

        for i in range(3):
            if self.rep_bool[3 * seq + i] == True: #La condition parcourt la liste comportant le booleen "La réponse a été trouvée pendant la présentation de l'event, exprimé par l'appuie sur le bouton" == True
                #Remplissage de la liste de l'Event "Is Thinking"
                seq_eda_IsThinking_n.append(L_signals[n_event_position[i]:n_press_position[i - n_False]])
                seq_bool_scr_peaks_Isth_n.append(L_bool_scr_peaks[n_event_position[i]:n_press_position[i - n_False]])
                seq_scr_amplitude_Isth_n.append(L_scr_amplitude[n_event_position[i]:n_press_position[i - n_False]])
                seq_scr_Height_Isth_n.append(L_scr_SCR_Height[n_event_position[i]:n_press_position[i - n_False]])

                # Remplissage de la liste de l'Event "Not Thinking"
                if n_event_position[i] + 200000 < len(L_signals): #S'assure que pour le dernier Event de chaque séquence n'est pas séléctonné une plage de donnée plus grande que la mesure du signal IRM (pour travailler sur les mêmes plages de temps entre les deux analyses)
                    seq_eda_NotThinking_n.append(L_signals[n_press_position[i- n_False]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_bool_scr_peaks_Noth_n.append(L_bool_scr_peaks[n_press_position[i- n_False]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_scr_amplitude_Noth_n.append(L_scr_amplitude[n_press_position[i- n_False]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_scr_Height_Noth_n.append(L_scr_SCR_Height[n_press_position[i- n_False]:n_event_position[i] + 200000])

                else:
                    seq_eda_NotThinking_n.append(L_signals[n_press_position[i - n_False]:])
                    seq_bool_scr_peaks_Noth_n.append(L_bool_scr_peaks[n_press_position[i - n_False]:])
                    seq_scr_amplitude_Noth_n.append(L_scr_amplitude[n_press_position[i - n_False]:])
                    seq_scr_Height_Noth_n.append(L_scr_SCR_Height[n_press_position[i - n_False]:])

            else: #Si self.rep_bool[3 * seq + i] == False alors la réponse n'a pas été trouvée ainsi il n'y a pas de moment "Not thinking" décrit avec les conditions données dans le protocole
                n_False = n_False + 1
                if n_event_position[i] + 200000 < len(L_signals):
                    seq_eda_IsThinking_n.append(L_signals[n_event_position[i]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_bool_scr_peaks_Isth_n.append(L_bool_scr_peaks[n_event_position[i]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_scr_amplitude_Isth_n.append(L_scr_amplitude[n_event_position[i]:n_event_position[i] + 200000])
                    seq_scr_Height_Isth_n.append(L_scr_SCR_Height[n_event_position[i]:n_event_position[i] + 200000])

                else:
                    seq_eda_IsThinking_n.append(L_signals[n_event_position[i]:])
                    seq_bool_scr_peaks_Isth_n.append(L_bool_scr_peaks[n_event_position[i]:])
                    seq_scr_amplitude_Isth_n.append(L_scr_amplitude[n_event_position[i]:])
                    seq_scr_Height_Isth_n.append(L_scr_SCR_Height[n_event_position[i]:])
```

```
            #Liste séparant les signaux selon l'évenement "Is Thinking" à travers Les séquences 1 à 5
            self.seq_eda_IsThinking.append(seq_eda_IsThinking_n)
            self.seq_eda_NotThinking.append(seq_eda_NotThinking_n)
            #Création de la liste nombre de peak dans l'évenement :

seq_number_peak_Isth.append([[sum(seq_bool_scr_peaks_Isth_n[0])]*len(seq_bool_scr_peaks_Isth_n[0]),[sum(seq
_bool_scr_peaks_Isth_n[1])]*len(seq_bool_scr_peaks_Isth_n[1]),[sum(seq_bool_scr_peaks_Isth_n[2])]*len(seq_boo
l_scr_peaks_Isth_n[2])]) #Création d'une liste de même taille composée des nombres de pics dans la dite séquence
            seq_number_peak_Noth_n = []
            if len(seq_bool_scr_peaks_Noth_n)>0:
                for i in range (len(seq_bool_scr_peaks_Noth_n)):

seq_number_peak_Noth_n.append([sum(seq_bool_scr_peaks_Noth_n[i])]*len(seq_bool_scr_peaks_Noth_n[i]))
            seq_number_peak_Noth.append(seq_number_peak_Noth_n)
            seq_bool_scr_peaks_Isth.append(seq_bool_scr_peaks_Isth_n)
            seq_bool_scr_peaks_Noth.append(seq_bool_scr_peaks_Noth_n)
            seq_scr_amplitude_Isth.append(seq_scr_amplitude_Isth_n)
            seq_scr_amplitude_Noth.append(seq_scr_amplitude_Noth_n)
            seq_scr_Height_Isth.append(seq_scr_Height_Isth_n)
            seq_scr_Height_Noth.append(seq_scr_Height_Noth_n)


        #Construction du dataframe pour coller ensuite à l'affichage avec seaborn
        IntensitySignal = []
        IsThinking = []
        Seq = []
        NumeroEvent = []
        Booleen_Peak = []
        Scr_amplitude = []
        Scr_height = []
        number_peak = []

        for i in range(len(self.seq_eda_IsThinking)):
            for j in range(len(self.seq_eda_IsThinking[i])):
                IntensitySignal.extend(self.seq_eda_IsThinking[i][j])
                IsThinking.extend("Yes" for _ in self.seq_eda_IsThinking[i][j])
                Seq.extend(i for _ in self.seq_eda_IsThinking[i][j])
                NumeroEvent.extend(j for _ in self.seq_eda_IsThinking[i][j])
                Booleen_Peak.extend(seq_bool_scr_peaks_Isth[i][j])
                Scr_amplitude.extend(seq_scr_amplitude_Isth[i][j])
                Scr_height.extend(seq_scr_Height_Isth[i][j])
                number_peak.extend(seq_number_peak_Isth[i][j])

        for i in range(len(self.seq_eda_NotThinking)):
            for j in range(len(self.seq_eda_NotThinking[i])):
                IntensitySignal = IntensitySignal + self.seq_eda_NotThinking[i][j]
                IsThinking = IsThinking + ["No"] * len(self.seq_eda_NotThinking[i][j])
                Seq = Seq + [i] * len(self.seq_eda_NotThinking[i][j])
                NumeroEvent = NumeroEvent + [j] * len(self.seq_eda_NotThinking[i][j])
                Booleen_Peak = Booleen_Peak + seq_bool_scr_peaks_Noth[i][j]
                Scr_amplitude = Scr_amplitude + seq_scr_amplitude_Noth[i][j]
                Scr_height = Scr_height + seq_scr_Height_Noth[i][j]
                number_peak = number_peak + seq_number_peak_Noth[i][j]

        self.df_signal = pd.DataFrame(data={"IntensitySignal": IntensitySignal, "IsThinking": IsThinking, "Seq": Seq,
```

```
                                    "NumeroEvent": NumeroEvent,"Booleen_Peak" : Booleen_Peak,"Scr_amplitude" :
Scr_amplitude,
                                    "Scr_height": Scr_height, "number_peak" : number_peak})
        #sns.boxplot(data=df, x="IntensitySignal", y="IsThinking")
        #plt.show()
        #sns.boxplot(data=self.df_signal[(self.df_signal["Booleen_Peak"] == 1)], x="IntensitySignal", y="IsThinking")
#Affiche seulement pour les peaks
        #sns.violinplot(data=self.df_signal[(self.df_signal["Booleen_Peak"] == 1)], x="Scr_amplitude",
y="IsThinking")
        #print(5)
    def Open_all_sub_OCEAN(self):
        self.all_sub = pd.read_csv(
            "/Personnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_signal_EDA/Multi_analyses/all_sub_df_OCEAN_10_02.csv",
            sep=",", header=0, index_col=0)
        del seance_01.all_sub['Unnamed: 0']
        self.all_sub_drop_dup = self.all_sub.drop_duplicates()
        #sn.heatmap(seance_01.all_sub_reduc.corr(), annot=True, fmt=".1f")

    def Reducing_all_sub(self):
        self.all_sub_reduc = self.all_sub.copy(deep=True)
        del seance_01.all_sub_reduc['Unnamed: 0']
        del seance_01.all_sub_reduc['IntensitySignal']
        del seance_01.all_sub_reduc['Seq']
        del seance_01.all_sub_reduc['NumeroEvent']
        del seance_01.all_sub_reduc['Booleen_Peak']
        del seance_01.all_sub_reduc['Scr_amplitude']
        del seance_01.all_sub_reduc['Scr_height']
        self.all_sub_reduc = seance_01.all_sub_reduc.drop_duplicates()

    def save_df_signal(self,i):
        self.df_signal.to_csv(path_access_data + "/Multi_analyses/" + "df_signal_" + str(i) + ".csv")


    def load_df_signal(self):
        self.multi_df_signal = []
        for i in range(1,15):
            self.multi_df_signal.append(pd.read_csv(path_access_data + "/Multi_analyses/" + "df_signal_" + str(i) +
".csv"))
        for i in [1,4,5,8,11,12,13]: #Sujet du groupe de contrôle
            self.multi_df_signal[i-1]["Sub"] = [i] * len(self.multi_df_signal[i-1])
            self.multi_df_signal[i-1]["Groupe"] = [0] * len(self.multi_df_signal[i-1])
        for i in [2,3,6,7,9,10,14]: #Sujet du groupe de contrôle
            self.multi_df_signal[i-1]["Sub"] = [i] * len(self.multi_df_signal[i-1])
            self.multi_df_signal[i-1]["Groupe"] = [1] * len(self.multi_df_signal[i-1])

        self.score_par = np.loadtxt("/Personnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_OCEAN_data/score_participant_1.txt")

        self.all_sub_df = pd.concat(self.multi_df_signal, ignore_index=True)
        self.all_sub_df["IsTh"] = [1 if v == "Yes" else 0 for v in self.all_sub_df["IsThinking"]]
        del self.all_sub_df["IsThinking"]

        self.all_sub_df["O"] = [float(self.score_par[self.all_sub_df["Sub"][i] - 1][0]) for i in range(len(self.all_sub_df))]
        print(3)
        self.all_sub_df["C"] = [float(self.score_par[self.all_sub_df["Sub"][i] - 1][1]) for i in range(len(self.all_sub_df))]
```

```
        print(4)
        self.all_sub_df["E"] = [float(self.score_par[self.all_sub_df["Sub"][i] - 1][2]) for i in range(len(self.all_sub_df))]
        print(5)
        self.all_sub_df["A"] = [float(self.score_par[self.all_sub_df["Sub"][i] - 1][3]) for i in range(len(self.all_sub_df))]
        print(6)
        self. all_sub_df["N"] = [float(self.score_par[self.all_sub_df["Sub"][i] - 1][4]) for i in
range(len(self.all_sub_df))]

        self.all_sub_df.to_csv("/Personnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_signal_EDA/Multi_analyses/all_sub_df_OCEAN_14sub.csv")



    def creation_file_event(self):
        self.list_startend_stim = [84.77945685386658, 88.12396335601807, 104.77945685386658,
108.88244605064392,
                                   124.77945685386658, 130.5121042728424, 273.44892024993896, 288.82819056510925,
                                   293.44892024993896, 320.1982033252716, 417.8721024990082, 441.0298933982849,
                                   457.8721024990082, 477.8721024990082, 584.5181286334991, 592.7262485027313,
                                   604.5181286334991, 624.1150598526001, 624.5181286334991, 644.3886015415192,
                                   754.2622048854828, 769.3167021274567, 774.2622048854828, 791.9685461521149,
                                   794.2622048854828, 824.2622048854828]
        #Liste booléen de l'évenement "est en réfléxion supposée" sur l'ensemble de l'expérience (prends en compte les
phases de questions)
        self.list_TR_01 = []
        for i in range(int((824.2622048854828 - 84.77945685386658) / 2.89)):
            for j in range(len(self.list_startend_stim)-1):
                if self.list_startend_stim[j] <= 84.77945685386658 + 2.89 * i <= self.list_startend_stim[j + 1]:
                    if (j + 1) % 2 == 1:
                        self.list_TR_01.append(1)
                    else:
                        self.list_TR_01.append(0)
        t = np.linspace(84.77945685386658,824.2622048854828,int((824.2622048854828-84.77945685386658)/2.89))

        # Création de l'évenement "moment de réflexion" = "instant entre l'apparition de l'évenement et la pression du
bouton"
        list_seq_startend_stim = [[84.77945685386658, 88.12396335601807], [104.77945685386658,
108.88244605064392],
                                  [124.77945685386658, 130.5121042728424], [273.44892024993896, 288.82819056510925],
                                  [293.44892024993896, 320.1982033252716], [417.8721024990082, 441.0298933982849],
                                  [457.8721024990082, 477.8721024990082], [584.5181286334991, 592.7262485027313],
                                  [604.5181286334991, 624.1150598526001], [624.5181286334991, 644.3886015415192],
                                  [754.2622048854828, 769.3167021274567], [774.2622048854828, 791.9685461521149],
                                  [794.2622048854828, 824.2622048854828]]

        # Liste booléen de l'évenement "est en réfléxion supposée" séparé avec les 5 séquences
        self.list_seq_TR_01 = []
        for i in range(5):
            self.list_seq_TR_01.append([])
            for j in range(number_volumes):
                for m in range(len(list_seq_startend_stim)):
                    if list_seq_startend_stim[m][0] <= self.list_seq_time_TR[i][j] <= list_seq_startend_stim[m][1]:
                        self.list_seq_TR_01[i].append(1)
                        break
                    elif m == len(list_seq_startend_stim) - 1 and not (list_seq_startend_stim[m][0] <=
```

```
self.list_seq_time_TR[i][j] <= list_seq_startend_stim[m][1]):
                    self.list_seq_TR_01[i].append(0)
                    break
                elif m == len(list_seq_startend_stim) - 1:
                    print("error création list_seq_TR_01 : situation non définie")
        #Création de l'évenement "pression sur le bouton"
        # Liste des booléen de l'évenement "pression sur le bouton"
        self.list_seq_press_01 = []

        # Liste des du signal phasique échantillonné au TR
        self.list_fullphasic_resamp = []
        for i in range(5):
            self.list_fullphasic_resamp.append([])
            for j in range(number_volumes):
                self.list_fullphasic_resamp[i].append(self.phasic_signal_seq[i][self.i_trig[i * 20 + j]-self.i_trig[i * 20]])
        #Liste eda signal resamp mis au format event de fsl
        list_seq_event_eda = []
        for i in range(5):
            list_seq_event_eda.append([])
            for j in range(number_volumes - 1):
                list_seq_event_eda[i].append([])
                list_seq_event_eda[i][j].append(self.list_seq_time_TR[i][j])
                list_seq_event_eda[i][j].append(self.list_seq_time_TR[i][j + 1] - self.list_seq_time_TR[i][j])
                list_seq_event_eda[i][j].append(self.list_fullphasic_resamp[i][j])
            list_seq_event_eda[i].append([])
            list_seq_event_eda[i][number_volumes - 1].append(self.list_seq_time_TR[i][number_volumes - 1])
            list_seq_event_eda[i][number_volumes - 1].append(2.89)
            list_seq_event_eda[i][number_volumes - 1].append(self.list_fullphasic_resamp[i][number_volumes - 1])
        # for i in range(5):
        #     np.savetxt("/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/ImpAcq_01/seq_" + str(
        #         i) + "_event_signal_eda_resamp.txt", np.array(list_seq_event_eda[i]))

        #Liste évenement du bouton pressé
        list_seq_event_press_d = []
        for i in range(5):
            list_seq_event_press_d.append([])
            for j in range(len(self.list_seq_press_d_time[i])):
                list_seq_event_press_d[i].append([])
                list_seq_event_press_d[i][j].append(str(self.list_seq_press_d_time[i][j]))
                list_seq_event_press_d[i][j].append("0.25")
                list_seq_event_press_d[i][j].append("1")
        # for i in range(5):
        #     np.savetxt("/VPersonnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/ImpAcq_01/seq_" + str(
        #         i) + "_event_press_d.txt", np.array(list_seq_event_press_d[i]))


    def analyse_seq(self):
        list_duration = []
        for i in range(int(len(self.list_startend_stim) / 2)):
            list_duration.append(self.list_startend_stim[i * 2 + 1] - self.list_startend_stim[i * 2])
        self.array_duration_stim = np.array(list_duration)
        list_time_display_first = []
        for i in range(int(len(self.list_startend_stim) / 2)):
            list_time_display_first.append(self.list_startend_stim[i * 2])
            #df_event = pd.DataFrame(data={'onset': list_time_display_first, 'duration': np.array(list_duration)})
```

```
    def perf_code(self):
        perf = []
        seance_01 = Seance()
        for i in range(14):
            print(i)
            #
            subject_n = "ImpAcq_0"+str(i)
            perf.append([])
            #
            temps = time.time()
            seance_01.load_array()
            perf[-1].append(time.time()-temps)
            temps = time.time()
            seance_01.load_seq()
            perf[-1].append(time.time() - temps)
            temps = time.time()
            seance_01.synchro()
            perf[-1].append(time.time() - temps)
            temps = time.time()
            seance_01.boxplot_seq_sub_n()
            perf[-1].append(time.time() - temps)
            seance_01.save_df_signal(i)

        np.savetxt("/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_signal_EDA/perf.txt",
                   np.array(np.array([perf[i] for i in range(len(perf))])))
        print("end")


seance_01 = Seance()


"""
Attention : lors du premier lancement le dossier doit forcément contenir les fichiers ImpAcq_0*_press_file.csv
(séparés par des points-virgules) et Impacq_0*_eda_trig.csv (séparés par des virgules) au format csv utf-8

condition sur Impacq_0*_eda_trig.csv :
Fréquence d'enregistrement 10 000Hz
Première ligne "Trigger - Custom, HLT100C - A 5",EDA - EDA100C-MRI" doit être supprimée

condition sur ImpAcq_0*_press_file.csv :

3 colonnes Temps(s) , Event, WordDisplay
Ne doit pas contenir de double pression pour un seul affichage, Première pression prise si double pression

Warning fichier txt Eda_trig [5,10,12,13,14] avec 3 colonnes, voir ligne 58,59 et changer indexe [0] to [1] et [1] to
[2]

Command acq - conversion acq to csv : acq2txt ImpAcq2023-06-22T16_25_16_ImpAcq_05.acq -o
Impacq_05_eda_trig.csv --channel-indexes=0,1
"""
#Parti chargement /ou création et enregistrement des fichiers

#Module à lancer lors du premier traitement des données :
#seance_01.save_txt2array()
#
#seance_01.identification_seq()
```

```
print(1)
#
#seance_01.save_seq()

#Module à lancer lorsque le premier traitement a déjà été fait:
#seance_01.load_array()
#seance_01.load_seq()



#Synchronisation entre le fichier press_files et le fichier eda_trigger

#seance_01.synchro() #Non optionnel puisque création d'attributs utiles aux modules de plot

#Création des fichier file_event pour fit avec FSL et l'analyse des données IRM
#seance_01.creation_file_event()

#Preprocessing et analyse
#seance_01.preproc_eda()
#seance_01.boxplot_seq_sub_n()
#seance_01.save_df_signal(1)
#plot_plot_seq_n :


"""
'EDA_Raw', 'EDA_Clean', 'EDA_Tonic', 'EDA_Phasic', 'SCR_Onsets',
       'SCR_Peaks', 'SCR_Height', 'SCR_Amplitude', 'SCR_RiseTime',
       'SCR_Recovery', 'SCR_RecoveryTime'
"""
# Charger la multi analyse
#seance_01.load_df_signal()
#seance_01.Open_all_sub_OCEAN()

#pd.read_csv("/Personnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_signal_EDA/Multi_analyses/all_sub_df_OC.csv",sep=",",header=0)
#all_sub_df.to_csv("/Personnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_signal_EDA/Multi_analyses/all_sub_df_OCEAN_10_02.csv")

#all_sub_drop_dup = all_sub_df.drop_duplicates()
```

ANNEXE E : CODE DU TRAITEMENT DES DONNÉES DU TEST OCEAN

```
import csv
import numpy as np

#Les questions présentes dans le test OCEAN

"Êtes-vous une femme ou un homme ?"
"Quel est votre date de naissance ?"
"Avez-vous déjà passé un test OCEAN auparavant ?"


#Question OCEAN :
#O  Ouverture à l'expérience (Originalité)
#C  Consciencieusité (Contrôle, Contrainte)
#E  Extraversion (Énergie, Enthousiasme)
#A  Agréabilité (Altruisme, Affection)
#N  Neuroticisme ou névrotisme (émotions Négatives, Nervosité)

#Est noté positivement ce qui augmente le score dans cette catégorie et négativement ce qui diminue le score dans celle-ci
questions = ["1 - Est volubile (aime parler) :",   #Extraversion +, [0,0,1,0,0]
"2- A tendance à remarquer les défauts des autres", #Agréabilité -,[0,0,0,-1,0]
"3 - Fait du bon travail", #Consciencosité +, [0,1,0,0,0]
"4- Est déprimée, mélancolique", #Neuroticisme +,[0,0,0,0,1]
"5- Est original(e), a des idées nouvelles", #Ouverture à l'expérience +,[1,0,0,0,0]
"6- Est réservé(e)", #Extraversion - [0,0,-1,0,0]
"7- Est serviable et généreux avec les autres", #Agréabilité +, [0,0,0,1,0]
"8- Peut être un peu négligent(e)", #Consciencosité -, [0,-1,0,0,0]
"9- Est relaxe, détendu(e), gère bien le stress", #Neuroticisme -,[0,0,0,0,-1]
"10- Est curieux(se) à propos de plusieurs choses différentes", #Ouverture à l'expérience +,[1,0,0,0,0]
"11- Est plein(e) d'énergie", #Extraversion +, [0,0,1,0,0]

"1- Provoque des disputes avec les autres", #Agréabilité -, [0,0,0,-1,0]
"2- Est un travailleur(se) fiable", #Consciencosité +,[0,1,0,0,0]
"3- Peut être tendu(e)", #Névrotisme +, [0,0,0,0,1]
"4- Est ingénieux(se), pense beaucoup", #Ouverture à l'expérience +, [1,0,0,0,0]
"5- Communique beaucoup d'enthousiasme", #Agréabilité + Extraversion+, [0,0,1,1,0]
"6- Est de nature indulgente (a tendance à pardonner)", #Agréabilité +, [0,0,0,1,0]
"7- A tendance à être désorganisé(e)", #Consciencosité -,[0,-1,0,0,0]
"8- S'inquiète beaucoup", #Neuroticisme +,[0,0,0,0,1]
"9- A une imagination active", #Ouverture à l'expérience +,[1,0,0,0,0]
"10- A tendance à être tranquille, silencieux(se)", #Extraversion -, névrotisme -, [0,0,-1,0,-1]
"11- Fait généralement confiance aux autres", #Agréabilité +,[0,0,0,1,0]

"1- A tendance à être paresseux(se)", #Consciencieusité -,[0,-1,0,0,0]
"2- Est stable émotivement, n'est pas facilement perturbé(e)", #Neuroticisme -,[0,0,0,0,-1]
"3- Est inventif(ve)", #Ouverture à l'expérience +,[1,0,0,0,0]
"4- S'affirme", #Extraversion +, [0,0,1,0,0]
"5- Peut être froid(e) et distant(e)", #Extraversion -, Neuroticisme+, [0,0,-1,0,1]
"6- Persévère jusqu'à ce que la tâche soit terminée", # Consciencieusité +, [0,1,0,0,0]
"7- Peut être de mauvaise humeur", # Neuroticisme +, Agréabilité -, [0,0,0,-1,1]
"8- Valorise les expériences artistiques, esthétiques", #Ouverture à l'expérience +,[1,0,0,0,0]
"9- Est parfois timide, inhibé(e)", #Extraversion -, [0,0,-1,0,0]
"10- Est prévenant(e) et gentil(le) avec presque tout le monde", #Agréabilité +,[0,0,0,1,0]
"11- Fait les choses efficacement", #Consciencieusité +, [0,1,0,0,0]
```

```
"1- Reste calme dans les situations tendues", #névrotisme -, Conscienciosité +,[0,1,0,0,-1]
"2- Préfère le travail routinier", #Ouverture à l'expérience -,[-1,0,0,0,0]
"3- Est ouvert(e), sociable", #Agréabilité +,Extraversion +, [0,0,1,1,0]
"4- Est parfois rude avec les autres", # Agréabilité -,[0,0,0,-1,0]
"5- Fait des plans et les suit", #Consciencosité +,[0,1,0,0,0]
"6- Devient facilement nerveux(se)", #Neuroticisme+, [0,0,0,0,-1]
"7- Aime réfléchir, jouer avec les idées", #Ouverture à l'expérience +, [1,0,0,0,0]
"8- A peu d'intérêts artistiques", #Ouverture à l'expérience -, [-1,0,0,0,0]
"9- Aime coopérer avec les autres", #Agréabilité + , Extraversion +,[0,0,1,1,0]
"10- Est facilement distrait(e)", #Consciencosité -, [0,-1,0,0,0]
"11- Est sophistiqué(e) en ce qui concerne les arts, la musique et la littérature" #Ouverture à l'expérience +,
[1,0,0,0,0]
]
#On créée des np.array sous la forme [0,0,0,0,0] de taille la valeur associée dans le test OCEAN, ex : Agréabilité + =
[0,0,0,1,0], ou
# Agréabilité +,Extraversion + = [0,0,1,1,0]
Point_questions = [[0,0,1,0,0],[0,0,0,-1,0],[0,1,0,0,0],[0,0,0,0,1],[1,0,0,0,0],[0,0,-1,0,0],[0,0,0,1,0],[0,-
1,0,0,0],[0,0,0,0,-1],[1,0,0,0,0],[0,0,1,0,0],
            [0,0,0,-1,0],[0,1,0,0,0],[0,0,0,0,1],[0,0,1/2,1/2,0],[0,0,0,1,0],[0,-1,0,0,0],[0,0,0,0,1],[0,0,0,0,-
1],[1,0,0,0,0,0],[0,0,-1/2,0,-1/2],[0,0,0,1,0],
            [0,-1,0,0,0],[0,0,0,0,-1],[1,0,0,0,0,0],[0,0,1,0,0],[0,0,-1/2,0,1/2],[0,1,0,0,0],[0,0,0,-1/2,1/2],[1,0,0,0,0,0],[0,0,-
1,0,0],[0,0,0,1,0],[0,1,0,0,0],
            [0,1/2,0,0,-1/2],[-1,0,0,0,0,0],[0,0,1/2,1/2,0],[0,0,0,-1,0],[0,1,0,0,0],[0,0,0,0,-1],[1,0,0,0,0],[-
1,0,0,0,0,0],[0,0,1/2,1/2,0],[0,-1,0,0,0],[1,0,0,0,0]
]

#Reponse max du test
array_p= [0]*44
for i in range(len(Point_questions)):
    array_p[i]=np.array(Point_questions[i])
a=0
for i in range(len(array_p)):
    a = a + array_p[i]
#Max = array([ 5. ,  1.5,  1.5,  2. , -1. ]) #Tout à fait d'accord à toute les réponses


Chemin = "/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_OCEAN_data/survey.user_input_6h.csv"
fichier = open(Chemin,"r")
cr = csv.reader(fichier, delimiter = ";")

Header = []
Header = next(cr)

rows = []

for row in cr :
    rows.append(row)
Participants = []
Nb_parti_in_file = int(len(rows)/47)
for i in range(Nb_parti_in_file): #Nombre de participants
    Participants.append([])
    for j in range(47): #Nombre de ligne par participant : 44 questions à choix multiple + 3 questions
        if j==1 :
            Participants[i].append(rows[j+i*47][11]) #Date de naissance pas sur la même colonne
        else:
```

```
            Participants[i].append(rows[j + i * 47][10])


for i in range(Nb_parti_in_file):
    for j in range(44):
        if Participants[i][j + 3] == "Fortement en accord":
            Participants[i][j + 3] = 4
        elif Participants[i][j + 3] == "Modérément en accord":
            Participants[i][j + 3] = 3
        elif Participants[i][j + 3] == "Modérément en en accord": #léger bug de double "en en"
            Participants[i][j + 3] = 3
        elif Participants[i][j + 3] == "Ni en accord, ni en désaccord":
            Participants[i][j + 3] = 2
        elif Participants[i][j + 3] == "Modérément en désaccord":
            Participants[i][j + 3] = 1
        elif Participants[i][j + 3] == "Modérément en en désaccord": #léger bug de double "en en"
            Participants[i][j + 3] = 1
        elif Participants[i][j + 3] == "Fortement en désaccord":
            Participants[i][j + 3] = 0

#Compte score max possible
Range_max = []
for i in range(5):
    Range_max.append([])
    max = 0
    min = 0
    for j in range(len(Point_questions)):
        if Point_questions[j][i] > 0 :
            max = max + Point_questions[j][i]
        else :
            min = min + Point_questions[j][i]
    print(max)
    print(min)
    Range_max[i].append(min*4)
    Range_max[i].append(max*4)



score_participant = []
for i in range(Nb_parti_in_file):
    score_participant.append(np.array([0, 0, 0, 0, 0]))
    for j in range(44):
        score_participant[i] = score_participant[i] + Participants[i][j + 3] *
np.array(Point_questions[questions.index(rows[j + 3 + 47 * i][14])])

for i in range(Nb_parti_in_file):
    for j in range(5):
        score_participant[i][j] = (score_participant[i][j] + (-1)*Range_max[j][0])/(Range_max[j][1]+ (-
1)*Range_max[j][0])*5



np.savetxt("/Perosnnal_PATH/Projet Recherche
Maîtrise/Analyse_OCEAN_data/score_participant_1.txt",score_participant)
```

```
import seaborn as sn
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy
#sn.heatmap(np.corrcoef([[score_participant[i][j] for i in range(len(score_participant))] for j in range(5)]),
xticklabels=["O","C","E","A","N"], yticklabels=["O","C","E","A","N"], annot=True, fmt=".1f")



sn.jointplot(x=[score_participant[i][0] for i in range(len(score_participant))],y=[score_participant[i][3] for i in
range(len(score_participant))],
              kind="reg", truncate=False,color="#f4835b", height=7)

#plt.savefig('/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Graph_article/Carte_corr_OCEAN_11sub.jpg')

# Correlation entre les réponses et le test OCEAN

Chemin1 = "/Personnal_PATH/Projet Recherche Maîtrise/Analyse_OCEAN_data/Time_rep_Ctrl_test.csv"

fichier1 = open(Chemin1,"r")
cr1 = csv.reader(fichier1, delimiter = ";")

Header1 = []


rows1 = []

for row in cr1 :
   rows1.append(row)

Participants_time = []

for i in range(int(len(rows1)/5)):
   Participants_time.append([])
   for j in range(5):
      Participants_time[i].append(str(rows1[i*5+j][0]) if len(rows1[i*5+j])==1 else 0 )

#Liste des temps et des scores OCEAN combinés
print(1)
Data_prep = [[] for i in range(6)]
for i in range(len(Participants_time)):
   for j in range(5):
      Data_prep[0].append(float(Participants_time[i][j].replace(",",".")) if  isinstance(Participants_time[i][j],str) else
Participants_time[i][j])
      for k in range(1,6):
         Data_prep[k].append(score_participant[i][k-1])
import scipy
#scipy.stats.pearsonr(Data_prep[0],Data_prep[1])
#scipy.stats.pearsonr(Data_prep[0],Data_prep[2])
#scipy.stats.pearsonr(Data_prep[0],Data_prep[3])
#scipy.stats.pearsonr(Data_prep[0],Data_prep[4])
#scipy.stats.pearsonr(Data_prep[0],Data_prep[5])

#Data_prep sans les fausses réponses (c'est à dire sans les temps de 20

Data_prep_120 = [[] for i in range(6)]
```

```
for j in range(len(Data_prep[0])):
    if Data_prep[0][j] < 20:
        for k in range(6):
            Data_prep_120[k].append(Data_prep[k][j])

#Data_prep avec booleen des réponses "Réponse vraie"
Data_prep_bool = [[] for i in range(6)]

for j in range(len(Data_prep[0])):
    if Data_prep[0][j] < 20:
        Data_prep_bool[0].append(1)
        for k in range(1,6):
            Data_prep_bool[k].append(Data_prep[k][j])
    else:
        Data_prep_bool[0].append(0)
        for k in range(1, 6):
            Data_prep_bool[k].append(Data_prep[k][j])

#Corrélation avec les erreurs de consignes

Parti_err_consigne = [0,2,4,1,2,5,6,3,0,2,0,2,3,2]
L_OCEAN = [[score_participant[i][j] for i in range(len(score_participant))] for j in range(5)] #score des particpants
regroupé par catégorie
sn.heatmap([[scipy.stats.spearmanr(L_OCEAN[i],L_OCEAN[j])[0] for i in range(5)] for j in range(5)],
xticklabels=["O","C","E","A","N"], yticklabels=["O","C","E","A","N"], annot=True, fmt=".1f")
plt.title("Carte des corrélations entre chaque axe du test OCEAN")
```

ANNEXE F : CODE DU TRAITEMENT DES DONNEES DU SIGNAL FONCTIONNEL

```
#!/bin/bash

#Resample

flirt -in small-img -ref small-img -out small_2mm -applyisoxfm 2

flirt -in AAN_DR_MNI152_1mm_v1p0_20150630.nii -ref AAN_DR_MNI152_1mm_v1p0_20150630.nii -out
AAN_DR_MNI152_2mm_v1p0_20150630.nii -applyisoxfm 2


flirt -in MNI152_T1_2mm_brain.nii.gz -ref MNI152_T1_2mm_brain.nii.gz -out MNI152_T1_3mm_brain.nii.gz -
applyisoxfm 3

flirt -in 03-acq-1mm_T1w_acq-1mm_T1w_20230502163801_3.nii -ref 03-acq-1mm_T1w_acq-
1mm_T1w_20230502163801_3.nii -out 03-acq-3mm.nii -applyisoxfm 3

flirt -in brain_highres2standard.nii.gz -ref brain_highres2standard.nii.gz -out brain_highres2standard_3mm.nii.gz -
applyisoxfm 3

flirt -in bet_brain_bin.nii.gz -ref bet_brain_bin.nii.gz -out bet_brain_bin_2mm.nii.gz -applyisoxfm 2

flirt -in highres.nii.gz -ref highres.nii.gz -out highres_2mm.nii.gz -applyisoxfm 2

flirt -in highres_bin.nii.gz -ref highres_bin.nii.gz -out highres_bin_2mm.nii.gz -applyisoxfm 2


#Conversion dicoms to nifti

dcm2niix folder_input

#chemin

Documents/ImpAcq/ImpAcq_
#creation fieldmap


#fsl_prepare_fieldmap <scanner> <phase_image> <magnitude_image> <out_image> <deltaTE (in ms)>

fsl_prepare_fieldmap SIEMENS /10-gre_field_mapping/10-
gre_field_mapping_gre_field_mapping_20230613161014_10_e2_ph.nii /09-gre_field_mapping/09-
gre_field_mapping_gre_field_mapping_20230613161014_9_e1.nii fmap_rads 2.97

betechobrain.nii.gz
10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_20230613161014_10_e2_ph.nii

fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_20230616153524_10_e2_ph.nii
betechobrain.nii.gz fmap_rads 2.46


#Sans le fieldmap déjà calculé
fugue -i 04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-1_20230613161014_4.nii -p fmap_rads.nii.gz --
dwell=0.0000026 --asym=0.00246 -s 0.5 -u result

2.6e-06
```

```
0.000026
#fieldmap preload
fugue -i 12-func_task-rest_func_task-rest_20230613161014_12.nii --dwell=0.000719992 --
loadfmap=fmap_rads.nii.gz -u result


#Automatisation création fieldmap  + correction EPI

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  if test ! -e fmap_9_10 ; then
   mkdir fmap_9_10
  fi
  if test ! -e fmap_14_15 ; then
   mkdir fmap_14_15
  fi
  cd fmap_9_10
  cp ../09-gre_field_mapping/09-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii .
  cp ../10-gre_field_mapping/10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii .
  bet 09-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii betechobrain.nii.gz fmap_rads
2.46
  cd ..
  cd fmap_14_15
  cp ../14-gre_field_mapping/14-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii .
  cp ../13-gre_field_mapping/13-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii .
  bet 13-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 14-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii betechobrain.nii.gz fmap_rads
2.46
  cd ../..
done


cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd fmap_9_10
  bet 09-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*ph.nii betechobrain.nii.gz fmap_rads
2.46
  cd ..
  cd fmap_14_15
  bet 13-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 14-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*ph.nii betechobrain.nii.gz fmap_rads
2.46
  cd ../..
done



cd
cd documents/ImpAcq
```

```
for i in `seq -w 1 8`; do
  cd ImpAcq_0${i}
  cd fmap_9_10
  bet 09-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*_e1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 10-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii betechobrain fmap_rads 2.46
  cd ../..
done

#Creation fieldmap en rad/s
cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 4 4`; do
  cd ImpAcq_0${i}
  cd fmap_9_10
  bet 13-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*1.nii betechobrain -f 0.4
  fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 14-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii betechobrain fmap_rads 2.46
  cd ../..
done



fugue -i 04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-1_20230616153524_4.nii --dwell=0.000560006 --
loadfmap=../fmap_9_10/fmap_rads.nii.gz --unwarpdir='y-' -u corrected_epi

#Correction de EPI avec fieldmap créée  + decompression fichier tar
cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  for j in `seq -w 1 5`; do
    cd *-func_task-anagrams_run-${j}
    fugue -i *-func_task-anagrams_run-${j}_func_task-anagrams_run-${j}_*$((j+3)).nii --dwell=0.000560006 --
loadfmap=../fmap_9_10/fmap_rads.nii.gz --unwarpdir='y-' -u corrected_epi
    gzip -d corrected_epi.nii.gz
    cd ..
  done
  cd ..
done

fsl_prepare_fieldmap SIEMENS 14-gre_field_mapping_gre_field_mapping_*.nii betechobrain fmap_rads 2.46

fugue -i 05-func_task-anagrams_run-2_func_task-anagrams_run-2_20230616153524_5.nii --dwell=0.000250006 --
loadfmap=../fmap_9_10/fmap_rads.nii.gz --unwarpdir='y-' -u corrected_epi
#même chose pour le RS
cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 12-func_task-rest
  fugue -i 12-func_task-rest*14.nii --dwell=0.000719992 --loadfmap=../fmap_14_15/fmap_rads.nii.gz --
unwarpdir='y-' -u corrected_epi
  cd ../..
done

#Decompression de tout les RS
cd
```

```
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 12-func_task-rest
  if test ! -e corrected_epi.nii; then
   gzip -d corrected_epi.nii.gz
  fi
  cd ../..
done

#binarisation pour mask
cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}

  cd 03-anat_T1w
  if test ! -e betbrain_mask; then
   fslmaths betbrain -bin betbrain_mask
  fi
  cd ../..
done

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_0${i}

  cd 03-anat_T1w
  if test ! -e betbrain_mask; then
   fslmaths betbrain -bin betbrain_mask
  fi
  cd ../..
done

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 04-func_task-anagrams_run-1
  fslsplit 04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-*4.nii
  mkdir "4D Split"
  cd '4D Split'
  mv ../vol* .
  cd ../../..
done

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 04-func_task-anagrams_run-1
  cd '4D Split'
  mv ../vol* .
  cd ../../..
done
```

```
python3
for i in range(1,14):
    bad_size = nib.load("/Users/pierrelechat/Documents/ImpAcq/ImpAcq_0"+str(i)+"/03-
anat_T1w/betbrain_mask.nii.gz")
    good_size = nib.load("/Users/pierrelechat/Documents/ImpAcq/ImpAcq_0"+str(i)+"/04-func_task-anagrams_run-
1/'4D Split'/vol0000.nii.gz")
    nib.save(nib.processing.resample_from_to(bad_size, good_size,
order=1),"/Users/pierrelechat/Documents/ImpAcq/ImpAcq_0"+str(i)+"/03-
anat_T1w/betbrain_mask_func1to5space.nii")


cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  for j in `seq -w 1 5`; do
    cd *-func_task-anagrams_run-${j}
    fslmaths corrected_epi.nii -mas ../03-anat_T1w/betbrain_mask_func1to5space.nii func_betbrain
    cd ..
  done
  cd ..
done


#même chose pour le RS

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 12-func_task-rest
  fslsplit corrected_epi.nii


  mkdir '4D Split'
  cd '4D Split'
  mv ../vol* .
  cd ../../..

done

cd
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 03-anat_T1w
  if test ! -e betbrain_mask.nii.gz; then
    fslmaths betbrain.nii.gz -bin betbrain_mask
  fi
  cd ../..
done

cd
```

```
cd documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 12-func_task-rest
  fslmaths corrected_epi.nii -mas ../03-anat_T1w/betbrain_mask_func1to5space_RS.nii func_betbrain
  cd ../..
done

#Analyse RS

#Rangement de tous les dicoms + conversion dicom to nifti
cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  for j in `seq -w 1 15`; do
   cd ${j}-*
   if test ! -e Dicoms; then
    cd ..
    dcm2niix ${j}-*

   fi
   cd ${j}-*

   if test ! -e Dicoms; then
    mkdir Dicoms
    cd Dicoms
    mv ../MR* .
    cd ..
   fi
   cd ..
  done
  cd ..
done

cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 04-func_task-anagrams_run-1
  if test ! -e "4D split corrected"; then
   fslsplit corrected_epi.nii
   mkdir "4D split corrected"
   cd "4D split corrected"
   mv ../vol* .
   cd ..
  fi
  cd ../..
done

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14`; do
  cd ImpAcq_${i}
  cd 04-func_task-anagrams_run-1
  if test ! -e "4D split corrected"; then
   fslsplit corrected_epi.nii
```

```
  mkdir "4D split corrected"
  cd "4D split corrected"
  mv ../vol* .
  cd ..

 for j in `seq -w 1 14`; do
  cd 0${j}-*
  fslmaths 0${i}*.nii -mas betbrain_mask_func1to5space.nii func_betbrain
  cd ..
 cd ..
done
```

```
fugue -i 04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-1_20230616153524_4.nii --dwell=0.0000026 --
loadfmap=fmap_rads.nii.gz --unwarpdir y- -u result1
```

```
#dcm2niix

dcm2niix 03-anat_T1w
dcm2niix 04-func_task-anagrams_run-1
dcm2niix 05-func_task-anagrams_run-2
dcm2niix 06-func_task-anagrams_run-3
dcm2niix 07-func_task-anagrams_run-4
dcm2niix 08-func_task-anagrams_run-5
dcm2niix 10-gre_field_mapping
dcm2niix 09-gre_field_mapping
dcm2niix 13-gre_field_mapping
dcm2niix 14-gre_field_mapping
dcm2niix 12-func_task-rest
```

```
#Script pour full analyse

#!/bin/bash

# Generate the subject list to make modifying this script
# to run just a subset of subjects easier.
cd
cd Documents/ImpAcq/ImpAcq_04
for i in `seq -w 1 5` ; do
 cd *-${i}
 cp ../04-func_task-anagrams_run-1/Design_feat/Design_feat.fsf .
  sed -i " "s|run-1|run-${i}|g" \
      Design_feat.fsf
  sed -i " "s|run_1|run_${i}|g" \
      Design_feat.fsf


  echo "===> Starting feat for run 1"
  feat Design_feat.fsf
  cd ..
done

cd
cd Documents/ImpAcq/ImpAcq_08
```

```
cp ../ImpAcq_04/04-func_task-anagrams_run-1/Design_feat/Design_feat.fsf .
for i in `seq -w 1 5` ; do
  cd *-${i}
  cp ../Design_feat.fsf .
    sed -i " "s|run-1|run-${i}|g" \
        Design_feat.fsf
    sed -i " "s|run_1|run_${i}|g" \
        Design_feat.fsf

    sed -i " "s|ImpAcq_04/Event/drive-download-20230707T150541Z-001|ImpAcq_08|g" \
        Design_feat.fsf


    echo "===> Starting feat for run 1"
    feat Design_feat.fsf
    cd ..
done


#Correction APPA

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}
  mkdir APPA_correction
  cd APPA_correction
  cp ../04-func_task-anagrams_run-1/04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-1_*4.nii .
  fslsplit 04-func_task-anagrams_run-1_func_task-anagrams_run-1_*4.nii
  mkdir 4d_split_func
  cd 4d_split_func
  mv ../vol* .
  cd ..
  cp ../11-func_task-anagrams_PA/11-func_task-anagrams_PA_func_task-anagrams_PA*11.nii .
  fslsplit 11-func_task-anagrams_PA_func_task-anagrams_PA*11.nii
  mkdir 4d_split_PA
  cd 4d_split_PA
  mv ../vol* .
  cd ..

  fslmerge -t EPI_func_PA_merge 4d_split_func/vol0000.nii.gz 4d_split_func/vol0001.nii.gz
4d_split_func/vol0002.nii.gz 4d_split_PA/vol0000.nii.gz 4d_split_PA/vol0001.nii.gz 4d_split_PA/vol0002.nii.gz
  cp ../../ImpAcq_02/APPA_correction/acquistion_param.csv .
  topup --imain=EPI_func_PA_merge.nii --datain=acquistion_param.csv --out=topup_result
  cd ../..

done



applytopup --imain=vol0000_func.nii.gz,vol0000_PA.nii.gz --inindex=1,2 --datain=acquistion_param.csv --
topup=topup_result --out=my_hifi_images
```

```
topup --imain=vol0000_merge.nii.gz --datain=acquistion_param.csv --out=topup_result

topup --imain=EPI_func_PA_merge.nii --datain=acquistion_param.csv --out=topup_result


cluster -i zstat1.nii.gz -t 1.5 -o cluster_index --osize=cluster_size > cluster_info.txt

#Cluster p-value correction : calculation of the smoothness estimate

smoothest -z zstat1.nii -m mask.nii.gz
DLH 0.0802583
VOLUME 164116
RESELS 57.5226
FWHMvoxel 3.63218 4.01812 3.94138
FWHMmm 7.26436 8.03625 7.88275

cluster -i zstat1.nii.gz -t 2.3 -o cluster_index --osize=cluster_size_tr_2.3 > cluster_info_tr2.3.txt
cluster -i zstat2 -t 2.3 -p 0.05 -d 0.8 --volume=164116 > cluster_zstat1.txt --osize=cluster_size_tr

#Task_RS in test group
smoothest -z zstat3.nii -m mask.nii.gz
DLH 0.00854091
VOLUME 154745
RESELS 540.535
FWHMvoxel 8.56073 8.68532 7.26988
FWHMmm 17.1215 17.3706 14.5398


cluster -i zstat1.nii.gz -t 2.3 --osize=cluster_size_tr_2.3 > cluster_info_tr2.3.txt
8. -p 0.01 -d 8.54091 --volume=154745
#merge_task_RS_test-Ctrl
DLH 0.0696299
VOLUME 154745
RESELS 66.3029
FWHMvoxel 4.24514 4.27185 3.65615
FWHMmm 8.49028 8.54371 7.31231

#Analyse du resting state :

#Création du fichier temporel : moyenne du signal sur une ROI donnée

fslmeants -i func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-02_mPFC.txt -m mPFC_reshape_trh_0.7_bin.nii.gz

fslmeants -i func_betbrain_copy.nii.gz -o sub-04_drn_activ.txt -m mask_resize.nii.gz

#Création du fichier temporel : moyenne du signal sur une ROI donnée sur tous les sujets

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*/12-func_task-rest
  cp ../../ImpAcq_02/12-func_task-rest/Design_prepro/Design_prepro.fsf .

  sed -i " "s|àà à|${i}|g" \
      Design_prepro.fsf
  echo 1.1
```

```
  feat Design_prepro.fsf
  if test -e Prepro_1.feat/reg/example_func2standard.mat; then
    flirt -in func_betbrain.nii.gz -ref ../../../standard/MNI152_T1_2mm_brain.nii.gz -out
func_betbrain_mni_space.nii.gz -init Prepro_1.feat/reg/example_func2standard.mat -applyxfm
  else
   echo 1
   break
  fi
  mkdir Split_4D_mni_space
  if test -e func_betbrain_mni_space.nii.gz; then
   fslsplit func_betbrain_mni_space.nii.gz
  else
   echo 2
  fi

  cd Split_4D_mni_space
  mv ../vol* .
  cd ..
  if test ! -e DMN_resample; then
   mkdir DMN_resample
  fi

  cd DMN_resample
  cp ../../../resample.py .
  cd ../../..

done

python3 resample.py


cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*/12-func_task-rest/DMN_resample

  fslmaths mPFC_reshape.nii.gz -thr 60 mPFC_reshape_tr_0.6.nii.gz
  fslmaths AngularGyrus_reshape.nii.gz -thr 60 AngularGyrus_reshape_tr_0.6.nii.gz
  fslmaths PCC_reshape.nii.gz -thr 60 PCC_reshape_tr_0.6.nii.gz

  fslmaths mPFC_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin mPFC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmaths AngularGyrus_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin AngularGyrus_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmaths PCC_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin PCC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz

  cd ..

  mkdir Mean_signal_ROI
  cd Mean_signal_ROI
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_mPFC.txt -m
../DMN_resample/mPFC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_AngularGyrus.txt -m
../DMN_resample/AngularGyrus_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_PCC.txt -m
../DMN_resample/PCC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  cd ../../..
```

```
done

fslmaths AngularGyrus_reshape_tr_0.6_resamp.nii.gz -bin AngularGyrus_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz
fslmaths mPFC_reshape_tr_0.6_resamp.nii.gz -bin mPFC_reshape_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz
fslmaths PCC_reshape_tr_0.6_resamp.nii.gz -bin PCC_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz

fslmeants -i ../func_betbrain_mni.nii.gz -o sub-14_mPFC.txt -m
../DMN_resample/mPFC_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz
fslmeants -i ../func_betbrain_mni.nii.gz -o sub-14_AngularGyrus.txt -m
../DMN_resample/AngularGyrus_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz
fslmeants -i ../func_betbrain_mni.nii.gz -o sub-14_PCC.txt -m
../DMN_resample/PCC_reshape_tr_0.6_resamp_bin.nii.gz

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*/12-func_task-rest/DMN_resample

  fslmaths mPFC_reshape.nii.gz -thr 60 mPFC_reshape_tr_0.6.nii.gz
  fslmaths AngularGyrus_reshape.nii.gz -thr 60 AngularGyrus_reshape_tr_0.6.nii.gz
  fslmaths PCC_reshape.nii.gz -thr 60 PCC_reshape_tr_0.6.nii.gz

  fslmaths mPFC_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin mPFC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmaths AngularGyrus_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin AngularGyrus_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmaths PCC_reshape_tr_0.6.nii.gz -bin PCC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz

  cd ..

  mkdir Mean_signal_ROI
  cd Mean_signal_ROI
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_mPFC.txt -m
../DMN_resample/mPFC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_AngularGyrus.txt -m
../DMN_resample/AngularGyrus_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  fslmeants -i ../func_betbrain_mni_space.nii.gz -o sub-${i}_PCC.txt -m
../DMN_resample/PCC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz
  cd ../../..

done

fslmeants -i func_betbrain_mni.nii.gz -o sub-12_PCC.txt -m DMN_resample/PCC_reshape_tr_0.6_bin.nii.gz


cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*/12-func_task-rest/
  mkdir Design_first_analyses
  cd Design_first_analyses
  cp ../../../ImpAcq_03/12-func_task-rest/Design_first_analyses/Design_first_analyses.fsf .
  sed -i " "s|àààà|${i}|g" \
      Design_first_analyses.fsf
  feat Design_first_analyses.fsf

  cd ../../..
```

```
done

#Première étape combinaison RS et Task : création dossier, importation fichier
cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*
  mkdir Task_RS_combined
  cd Task_RS_combined



  for i in `seq 1 5`; do
   cp ../*anagrams*-${i}/func_betbrain.nii.gz func_betbrain_${i}.nii.gz
  done

  mkdir vol_Task

  fslsplit func_betbrain_1.nii.gz

  cd vol_Task
  mv ../vol* .
  cd ..
  pwd
  cp ../*task-rest*/func_betbrain_mni_space.nii.gz rs_mni_space.nii.gz

  fslsplit rs_mni_space.nii.gz
  mkdir vol_rs
  cd vol_rs
  pwd
  mv ../vol* .

  cd ..
  mv vol_rs/vol_Task .
  cd ../..

done

#Utilisation de fsleyes pour placer func_betbrain dans MNI et merge des task_mni
cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*
  cd Task_RS_combined
  cp ../*anagrams*/Analyse_FvsNF.feat/reg/example_func2standard.mat .
  cp ../*anagrams*/Analyse_Found.feat/reg/example_func2standard.mat .
  cp ../*anagrams*/Analyse_FvsNF.feat/reg/standard.nii.gz .
  cp ../*anagrams*/Analyse_Found.feat/reg/standard.nii.gz .
  if test -e example_func2standard.mat ; then
   flirt -in func_betbrain_1.nii.gz -ref standard.nii.gz -applyxfm -init example_func2standard.mat -out
func_betbrain_std_1.nii.gz
   flirt -in func_betbrain_2.nii.gz -ref standard.nii.gz -applyxfm -init example_func2standard.mat -out
func_betbrain_std_2.nii.gz
   flirt -in func_betbrain_3.nii.gz -ref standard.nii.gz -applyxfm -init example_func2standard.mat -out
func_betbrain_std_3.nii.gz
   flirt -in func_betbrain_4.nii.gz -ref standard.nii.gz -applyxfm -init example_func2standard.mat -out
```

```
func_betbrain_std_4.nii.gz
   flirt -in func_betbrain_5.nii.gz -ref standard.nii.gz -applyxfm -init example_func2standard.mat -out
func_betbrain_std_5.nii.gz
  fi
  fslmerge -t func_merge_std func_betbrain_std_*
  cd ../..
done

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*
  cd Task_RS_combined


  rm -r vol_Task
  mkdir vol_Task
  fslsplit func_betbrain_std_1.nii.gz
  cd vol_Task
  mv ../vol* .

  cd ..
  mv vol_Task/vol_rs .
  cd ../..

done
#Script python pour mettre le RS et les func dans le même header
#Script pour creer le merged RS_resamp

cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_0${i}*/Task_RS_combined/vol_rs
  fslmerge -t RS_resamp_merge RS_resamp*
  cd ../../..
done
#Script suppression des dossiers Task_RS
cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_${i}*
  rm -r Task_RS_combined


  cd ..
done


#Script pour creer le merged Task +rs
cd
cd Documents/ImpAcq
for i in `seq -w 1 14` ; do
  cd ImpAcq_0${i}*/Task_RS_combined
  cp vol_rs/RS_resamp_merge.nii.gz .
  fslmerge -t merge_task_rs_mni func_merge_std.nii.gz RS_resamp_merge.nii.gz
  cd ../..
```

ANNEXE G : QUESTIONNAIRE À CHOIX MUTLIPLE : TEST OCEAN

O Ouverture d'esprit (Originalité)

C Conscienciosité (Contrôle, contrainte)

E Extraversion (énergie, enthousiasme)

A Agréabilité (altruisme, affection)

N Névrotisme (émotion négative, nérvosité)

Êtes-vous une femme ou un homme ?

- Femme
- Homme
- Autre

Quel est votre âge ?

Avez-vous déjà passé ce test auparavant ?

- Non
- Oui

Je me perçois comme quelqu'un qui :

1- Est volubile (aime parler)
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord
   - Ni en accord, ni en désaccord
   - Modérément en accord
   - Fortement en accord

2- A tendance à remarquer les défauts des autres
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

3- Fait du bon travail
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord
   - Ni en accord, ni en désaccord
   - Modérément en accord
   - Fortement en accord

4- Est déprimé(e), mélancolique
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord
   - Ni en accord, ni en désaccord
   - Modérément en accord
   - Fortement en accord

5- Est original(e), a des idées nouvelles
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord
   - Ni en accord, ni en désaccord
   - Modérément en accord
   - Fortement en accord

6- Est réservé(e)
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord
   - Ni en accord, ni en désaccord
   - Modérément en accord
   - Fortement en accord

7- Est serviable et généreux avec les autres
   - Fortement en désaccord
   - Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

8- Peut être un peu négligent(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

9- Est relaxe, détendu(e), gère bien le stress

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

10- Est curieux(se) à propos de plusieurs choses différentes

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

11- Est plein(e) d'énergie

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

12- Provoque des disputes avec les autres

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

13- Est un travailleur(se) fiable

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

14- Peut être tendu(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

15- Est ingénieux(se), pense beaucoup

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

16- Communique beaucoup d'enthousiasme

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

17- Est de nature indulgente (a tendance à pardonner)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

18- A tendance à être désorganisé(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

19- S'inquiète beaucoup

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

20- A une imagination active

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

21- A tendance à être tranquille, silencieux(se)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

22- Fait généralement confiance aux autres

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

23- A tendance à être paresseux(se)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

24- Est stable émotivement, n'est pas facilement perturbé(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

25- Est inventif(ve)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

26- S'affirme

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

27- Peut être froid(e) distant(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

28- Persévère jusqu'à ce que la tâche soit terminée

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

29- Peut être de mauvaise humeur

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

30- Valorise les expériences artistiques, esthétiques

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

31- Est parfois timide, inhibé(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

32- Est prévenant(e) et gentil(le) avec presque tout le monde

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

33- Fait les choses efficacement

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

34- Reste calme dans les situations tendues

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

35- Préfère le travail routinier

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

36- Est ouvert(e), sociable

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

37- Est parfois rude avec les autres

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

38- Fait des plans et les suit

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

39- Devient facilement nerveux(se)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

40- Aime réfléchir, jouer avec des idées

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

41- A peu d'intérêts artistiques

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

42- Aime coopérer avec les autres

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord

- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

43- Est facilement distrait(e)

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord

44- Est sophistiqué(e) en ce qui concerne les arts, la musique et la littérature

- Fortement en désaccord
- Modérément en désaccord
- Ni en accord, ni en désaccord
- Modérément en accord
- Fortement en accord