

Imagerie multimodale des réseaux neuronaux actifs au repos en lien avec la conscience et le langage

Auteur : Gillet, Anaïs

Promoteur(s) : Majerus, Steve

Faculté : Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

Diplôme : Master en sciences psychologiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21974>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Imagerie multimodale des réseaux neuronaux actifs au repos en lien avec la conscience et le langage

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Master en
Sciences psychologiques

Anaïs Gillet

Promoteur : Steve MAJERUS

Co-promotrice : Charlène AUBINET

Lectrices : Christel DEVUE

Christine BASTIN

Année académique 2023-2024

Remerciements

Je remercie sincèrement le Professeur Majerus, mon promoteur, pour la confiance accordée et l'opportunité de mener à bien ce projet, ainsi que pour ses cours enrichissants tout au long de mon cursus.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Charlène Aubinet, ma co-promotrice, pour sa confiance, ses conseils avisés et son soutien. Merci pour votre aide précieuse et votre bienveillance inestimable.

Je remercie par avance les Professeures Devue et Bastin pour leur lecture attentive et l'intérêt qu'elles porteront à ce travail.

Je remercie sincèrement tous les participants de cette étude que j'ai eu la chance de rencontrer ; merci pour toutes vos histoires et anecdotes, votre patience et votre gratitude.

Je tiens à remercier toutes les personnes du Coma Science Group ayant construit ce projet. Merci pour votre accueil chaleureux, ainsi que pour votre soutien et vos précieux conseils. Un remerciement particulier à Arianna Sala, Naji Alnagger pour leur aide inestimable dans les analyses de ce mémoire et Olivia Gosseries pour sa relecture attentive et tous ses conseils.

Sans vous, aucune de ces lignes n'aurait pu être écrite.

Je souhaite exprimer ma plus grande gratitude envers mes amis qui m'ont soutenue tout au long de ce cursus et m'ont permis de quitter l'université avec des souvenirs inoubliables. Grâce à votre présence, j'ai pu rire malgré les craintes et les doutes. Lola, je te remercie de m'avoir guidée lorsque j'ai perdu confiance. Sans toi, je n'aurais pas pu réaliser mes rêves.

Je remercie sincèrement ma famille pour son soutien inconditionnel. Merci à mes parents et à ma sœur de m'avoir toujours soutenue et de m'avoir fait confiance tout au long de ce cursus. Je tiens à remercier particulièrement ma marraine et son mari Stéphane pour leur relecture attentive de ce mémoire.

Antoine, merci pour ton soutien inébranlable, ta patience et tes encouragements tout au long de ce Master. Merci pour ton écoute attentive et pour ton réconfort dans les moments les plus difficiles.

Table des matières

INTRODUCTION	- 1 -
<u>1. EXPÉRIENCES INTÉRIEURES AU REPOS.....</u>	<u>- 1 -</u>
<u>2. LA CONSCIENCE</u>	<u>- 1 -</u>
2.1. LES ÉTATS DE CONSCIENCE ALTÉRÉE	- 2 -
2.2. TECHNIQUES DE NEURO-IMAGERIE	- 5 -
<u>3. LANGAGE ET CONSCIENCE</u>	<u>- 6 -</u>
3.1. EN ÉVEIL POST-COMA	- 7 -
3.2. APPROCHES THÉORIQUES.....	- 8 -
<u>4. EXPÉRIENCES INTÉRIEURES ET LANGAGE</u>	<u>- 10 -</u>
4.1. LE VAGABONDAGE DE L'ESPRIT	- 10 -
4.2. DISCOURS INTERNE ET CONSCIENCE INTÉRIEURE.....	- 11 -
<u>5. NEURO-IMAGERIE DE LA CONSCIENCE ET DES EXPÉRIENCES INTÉRIEURES.....</u>	<u>- 14 -</u>
5.1. LES RÉSEAUX NEURONAUX DE LA CONSCIENCE	- 15 -
5.2. CONSCIENCE INTÉRIEURE ET CONNEXION À L'ENVIRONNEMENT	- 17 -
5.3. IMAGERIE MENTALE VISUELLE	- 17 -
5.4. LANGAGE ET DISCOURS INTERNE.....	- 18 -
5.5. RÔLE DU RÉSEAU DU MODE PAR DÉFAUT	- 19 -
OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	- 21 -
<u>1. OBJECTIFS</u>	<u>- 21 -</u>
<u>2. HYPOTHÈSES</u>	<u>- 21 -</u>
MÉTHODOLOGIE	- 22 -
<u>1. PARTICIPANTS</u>	<u>- 22 -</u>
<u>2. MATÉRIEL.....</u>	<u>- 22 -</u>
2.1. SCREENING.....	- 22 -
2.2. EXPÉRIENCES INTÉRIEURES	- 23 -
<u>3. PROCÉDURE.....</u>	<u>- 23 -</u>
3.1. ÉVALUATIONS DE NEURO-IMAGERIE	- 23 -
<u>4. ANALYSES STATISTIQUES.....</u>	<u>- 25 -</u>
4.1. ANALYSES COMPORTEMENTALES	- 25 -

4.2.	ANALYSES DE NEURO-IMAGERIE	- 26 -
4.3.	ANALYSES DES DONNÉES COMPORTEMENTALES EN LIEN AVEC LES DONNÉES DE NEURO-IMAGERIE	- 29 -
RÉSULTATS		- 31 -
1.	<u>PARTICIPANTS</u>	<u>- 31 -</u>
2.	<u>ANALYSES COMPORTEMENTALES.....</u>	<u>- 31 -</u>
3.	<u>ANALYSES DE NEURO-IMAGERIE.....</u>	<u>- 35 -</u>
3.1.	IRMF.....	- 35 -
3.1.	TEP	- 37 -
4.	<u>ANALYSES DES DONNÉES COMPORTEMENTALES EN LIEN AVEC LA NEURO-IMAGERIE</u>	<u>- 37 -</u>
4.1.	DISCOURS INTERNE	- 37 -
4.2.	IMAGERIE MENTALE VISUELLE	- 40 -
4.3.	ORIENTATION INTÉRIEURE	- 41 -
4.4.	ORIENTATION EXTÉRIEURE.....	- 41 -
DISCUSSION		- 44 -
1.	<u>PROFILS D'EXPÉRIENCES INTÉRIEURES</u>	<u>- 44 -</u>
2.	<u>RÉSEAUX NEURONAUX DES EXPÉRIENCES INTÉRIEURES</u>	<u>- 46 -</u>
3.	<u>LIMITES.....</u>	<u>- 50 -</u>
4.	<u>PERSPECTIVES</u>	<u>- 50 -</u>
5.	<u>CONCLUSIONS</u>	<u>- 51 -</u>
BIBLIOGRAPHIE		- 53 -
ANNEXES.....		- 73 -
1.	<u>ANNEXE A : LISTE COMPLÈTE DES CRITÈRES D'EXCLUSION.....</u>	<u>- 73 -</u>
2.	<u>ANNEXE B : QUESTIONNAIRE UTILISÉ DANS LE BUT D'ÉVALUER LES EXPÉRIENCES INTÉRIEURES DES PARTICIPANTS.</u>	<u>- 75 -</u>
3.	<u>ANNEXE C : LISTE DES QUESTIONNAIRES ET LEUR OBJECTIF.</u>	<u>- 76 -</u>
4.	<u>ANNEXE D : ORGANISATION DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROTOCOLE.</u>	<u>- 78 -</u>
5.	<u>ANNEXE E : DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES ET DONNÉES DISPONIBLES POUR CHAQUE PARTICIPANT</u>	<u>- 80 -</u>
6.	<u>ANNEXE F : STATISTIQUES PARAMÉTRIQUES POUR CHAQUE CLUSTER DE VOXELS.</u>	<u>- 83 -</u>
7.	<u>ANNEXE G : VALEURS SUV ET SUV_{RGLOBAL} SUR BASE DES QUATRE MASQUES DE CONNECTIVITÉ FONCTIONNELLE.....</u>	<u>- 85 -</u>

Table des abréviations

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

BOLD : Blood Oxygen Level Dependent

CCP : Cortex Cingulaire Postérieur

CFPL : Cortex Fronto-Pariétal Latéral

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CPFDL : Cortex Préfrontal Dorsolatéral

CPFM : Cortex Préfrontal Médian

CVP : Cortex Visuel Primaire

DES : Descriptive Experience Sampling

DMN : Default Mode Network

ECA : État de Conscience Altérée

EECM : Émergence de l'État de Conscience Minimale

EEG : Électroencéphalogramme

ECM : État de Conscience Minimale

ENR : Éveil Non Répondant

¹⁸FDG : Fluorodésoxyglucose

GLM : General Linear Model

GWT : Global Workspace Theory

HOT : Higher-Order Theories

IIT : Integrated Information Theory

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

LIS : Locked-In Syndrome

SUV : Standardized Uptake Value

SUVr : Standardized Uptake Value ratio

TEP : Tomographie par Émission de Positons

Introduction

1. Expériences intérieures au repos

Lorsqu'une personne se trouve dans un état de repos, que ce soit le soir dans son lit avant l'endormissement ou encore dans un scanner lors d'un examen médical, elle peut expérimenter et rapporter différents types d'expériences intérieures. De manière évidente, cet état d'éveil au repos est avant tout un état de *conscience*. Comme nous allons le voir, la conscience est toutefois un concept particulièrement difficile à définir et un débat subsiste dans la littérature scientifique concernant ses corrélats neuronaux (Seth & Bayne, 2022). De récentes études ont également mis en évidence une imbrication étroite entre les processus liés à la conscience et au *langage*, notamment le *discours interne* (Aubinet et al., 2022; Skipper, 2022). Or, le discours interne, tout comme l'imagerie mentale visuelle, sont aussi connus comme étant des caractéristiques phénoménologiques prédominantes du vagabondage mental expérimenté lorsque notre attention s'écarte de la tâche en cours (Stawarczyk et al., 2011).

Ainsi, les expériences intérieures sont diverses et associées à différents types d'activités cérébrales que nous souhaitons explorer dans le cadre de ce mémoire. Au-delà du discours interne et de l'imagerie mentale visuelle, il est également possible d'examiner l'orientation des pensées. Les pensées spontanées sont souvent liées à l'activité des réseaux neuronaux de l'état de repos, comme le réseau par défaut (*Default Mode Network* – DMN) qui joue un rôle clé dans la génération de ces expériences internes (Andrews-Hanna et al., 2010). Les différentes sections de notre introduction théorique tenteront donc de définir ces différentes expériences et de décrire les activités cérébrales qui les sous-tendent à travers une revue de la littérature scientifique.

2. La conscience

De par toute sa complexité, la notion de conscience est difficile à définir et de nouvelles terminologies et modèles ne cessent de voir le jour, chacun étant influencé par leur théorie sous-jacente (Blumenfeld, 2016; Morin, 2006). Ce que l'on sait, c'est que notre niveau de conscience varie naturellement au cours de la journée, variation particulièrement évidente lorsque l'on s'endort. La conscience peut également être perturbée par la prise de médicaments, de drogues et il peut en résulter une certaine confusion.

Du point de vue des neurosciences, deux concepts de la conscience sont particulièrement étudiés : son niveau et son contenu (Bayne et al., 2023; Blumenfeld, 2016). Le contenu se réfère aux informations traitées, tandis que le niveau correspond aux degrés de vigilance, d'attention et d'éveil qui peuvent évidemment affecter ce traitement. Récemment, Martial et ses collaborateurs (2020) ont proposé un cadre théorique selon lequel la conscience serait scindée en trois composantes. On peut retrouver le niveau d'éveil (médié par le tronc cérébral et qui correspond à l'ouverture des yeux), la conscience de soi (qui correspond à l'imagerie mentale visuelle, le discours interne ou le vagabondage de l'esprit, indépendants de l'environnement) et enfin la connexion à l'environnement (*connectedness* – perception des stimuli sensoriels) (Martial et al., 2020).

Plusieurs auteurs ont tenté de modéliser le phénomène de la conscience. Tout d'abord, selon le modèle de l'espace de travail global (*Global Workspace Theory*, GWT), la conscience permettrait d'avoir un espace de travail cérébral global largement répandu dans le cerveau (Baars, 2002). De plus, un seul contenu cohérent à la fois serait capable d'atteindre le niveau de conscience. Ici, le cortex frontal jouerait un rôle déterminant avec le cortex sensoriel qui diffuserait les informations à l'ensemble du système (Baars, 2002; Skipper, 2022). Ensuite, selon les théories d'ordre supérieur (*Higher-Order Theories*, HOT), la simple perception sensorielle d'un stimulus n'est pas une condition suffisante pour que ce même stimulus soit accessible à la conscience (concept partagé par le modèle GWT) (Brown et al., 2019). En effet, la méta-conscience serait indispensable, c'est-à-dire qu'il faut être conscient de soi-même comme étant en pleine perception sensorielle, mais aussi en fonctionnement mental continu. Cette méta-conscience reflète une représentation d'ordre supérieur avec le cortex préfrontal jouant un rôle clé dans cette métacognition. Enfin, la théorie de l'information intégrée (*Integrated Information Theory*, IIT) part des propriétés phénoménologiques du stimulus (son existence intrinsèque, sa composition, les informations qu'il contient, son intégration comme un tout unique et sa distinction par rapport aux autres stimuli) et en déduit des postulats sur base de ses caractéristiques physiques (des zones cérébrales correspondantes) (Tononi et al., 2016). Ces postulats pourraient ensuite être utiles pour identifier le substrat physique de la conscience. Les régions situées dans la partie « arrière » du cortex, telles que les zones temporales, pariétales et occipitales, constituent une « zone chaude postérieure » qui semble avoir un rôle direct dans la détermination des contenus de la conscience (Boly et al., 2017). De plus, l'IIT propose un cadre mathématique afin d'évaluer la quantité et la qualité de la conscience.

2.1. Les états de conscience altérée

Depuis une cinquantaine d'années maintenant, grâce au développement de la ventilation mécanique et aux progrès médicaux, le pronostic vital des patients victimes d'atteintes cérébrales sévères ne cesse de s'améliorer. L'augmentation de ce taux de survie entraîne l'apparition de ce qu'on appelle des « états de conscience altérée » (ECA) de plus en plus complexes, qui constituent une véritable opportunité dans l'étude de la conscience humaine. Un ECA est caractérisé par l'altération d'une des composantes de la conscience (niveau d'éveil, conscience de soi et conscience de l'environnement). Au-delà de l'aspect dramatique auquel les patients en ECA et leur famille sont confrontés, leur examen constitue une opportunité unique d'étudier la conscience et ses mécanismes sous-jacents.

Tout d'abord, le coma est caractérisé par une fermeture constante des yeux, sa durée est supérieure à une heure et la récupération peut prendre de quelques heures à 4 semaines, à l'exception des comas pharmacologiques qui peuvent durer plusieurs mois (Bodart et al., 2013) (voir Figure 1). Ensuite, l'état d'éveil non répondant (ENR) se définit par une ouverture des yeux préservée, tout comme les fonctions autonomes et un cycle veille-sommeil généralement préservé. Par contre, les mouvements orientés et le langage sont impossibles (Sanz et al., 2018). Face à un état de conscience minimale (ECM), on peut différencier deux entités cliniques : l'ECM- et l'ECM +, qui se différencient par l'absence (ECM-) ou la présence (ECM+) de processus langagiers. (Bruno et al., 2011).

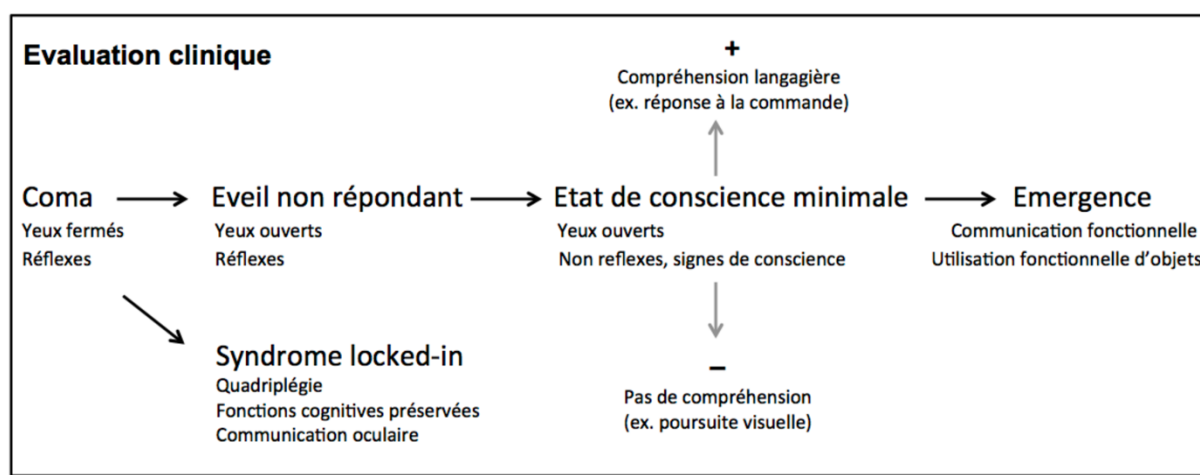


Figure 1. Présentation des différents profils cliniques des ECAs, du LIS et de l'EECM. (image adaptée de Bodart et al., 2013).

L'émergence de l'ECM (EECM) est caractérisé par une utilisation fonctionnelle d'objets et/ou une communication fonctionnelle (Sanz et al., 2018). Toutefois, il est important de préciser que l'EECM n'est pas considérée comme un ECA dans la mesure où ces patients présentent une communication fonctionnelle. Notons enfin que le locked-in-syndrome (LIS) est un cas particulier. En effet, ce n'est pas un ECA dans la mesure où le patient est capable de

communiquer ses pensées et présente généralement des fonctions cognitives préservées, ainsi qu'une conscience de soi et une connexion à l'environnement normales. Cependant, ce syndrome empêche le moindre mouvement moteur, à l'exception des mouvements oculaires ou distaux dans certains cas (Sanz et al., 2018).

Afin de mener une évaluation complète en vue de poser un diagnostic, les professionnels peuvent recourir à différentes échelles comportementales, ainsi qu'à des examens de neuro-imagerie. Toutefois, avant chaque évaluation comportementale, plusieurs facteurs sont à prendre en compte. En effet, suite à la lésion cérébrale, d'autres atteintes peuvent influencer l'observation. Le patient peut présenter par exemple des déficits cognitifs tels que l'aphasie, l'agnosie ou l'apraxie, ce qui peut avoir un impact sur sa capacité à communiquer (Schnakers & Majerus, 2011). Il ne faut pas non plus négliger les éventuelles atteintes sensorielles qui peuvent mener à une surdité ou une cécité (Gosseries et al., 2014). Afin d'éliminer la possibilité d'un LIS, il faut impérativement vérifier si le patient ne souffre pas de paralysie (Schnakers & Majerus, 2011). Dans la mesure où un seul signe de conscience peut être important pour différencier un patient ECM d'un patient ENR, il est également difficile de distinguer ces deux troubles lorsque la vigilance est fluctuante (Demertzi et al., 2015). D'autres facteurs tels que la douleur, certaines complications médicales, une sédation médicamenteuse ainsi que le manque de coopération peuvent entraver le bon diagnostic du patient (Gosseries et al., 2014).

Au vu de ces difficultés associées à l'évaluation comportementale des patients en éveil de coma, il est particulièrement important d'effectuer des examens de neuro-imagerie qui pourront participer au diagnostic de l'état de conscience. Une étude récente a montré qu'une large proportion de patients initialement diagnostiqués comme ENR présentent en réalité une activité corticale similaire à l'ECM, phénomène appelé « dissociation cognitivo-motrice » (Thibaut et al., 2021). Les auteurs ont suggéré que ces patients pourraient appartenir à une nouvelle entité diagnostique appelée « ECM* ». L'utilisation de techniques de neuro-imagerie de pointe semble donc particulièrement appropriée pour permettre d'affiner le diagnostic des patients en ECA.

On peut donc parler de différents niveaux de conscience lorsqu'on part du principe que les patients EECM ont une conscience supérieure aux patients ENR, par exemple. Cependant, certains auteurs proposent d'évaluer la conscience selon une approche multidimensionnelle, plutôt que par niveaux. Cette approche considère des « états globaux » se distinguant sur des bases cognitives, comportementales et physiologiques (Bayne et al., 2023).

Maintenant que nous avons exploré les différents ECA, nous allons passer en revue les différentes techniques de neuro-imagerie permettant de les distinguer et de faciliter leur diagnostic.

2.2. *Techniques de neuro-imagerie*

Les techniques de neuro-imageries sont essentielles en éveil de coma afin d'étudier les réseaux neuronaux de la conscience qui permettent de différencier les comportements réflexes des comportements volontaires, distinction particulièrement importante pour éviter le diagnostic erroné d'ENR (Vanhaudenhuyse et al., 2011). L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Cassol et al., 2018) se base notamment sur la méthode BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*), qui mesure les changements du flux sanguin ainsi que son niveau d'oxygénation. Cela permet de se rendre compte du niveau d'activité de certaines régions du cerveau (Banich & Compton, 2018b). Plus précisément, la méthode BOLD utilise les différences de propriétés magnétiques entre le sang oxygéné et désoxygéné. Le sang désoxygéné, contrairement au sang oxygéné, va perturber le champ magnétique placé dans l'IRMf, ce qui va rendre difficile la détection d'un changement de signal (Banich & Compton, 2018). Cette technique mesure la réponse hémodynamique qui correspond à la réponse du système à la demande d'oxygène dans les régions les plus activées. Un avantage particulier de l'IRMf est qu'elle donne une mesure de l'activité cérébrale en quelques secondes, alors que ce délai est de quelques minutes pour la tomographie par émission de positons (TEP). De plus, de par sa capacité à évaluer la connectivité entre les cortex auditifs et visuels, l'IRMf permet de distinguer les patients ENR des patients ECM (Demertzi et al., 2015).

Une seconde technique utilisée est la TEP, qui permet de mesurer le métabolisme du glucose ainsi que son débit sanguin (Cassol et al., 2018). Elle fonctionne par l'injection d'un traceur appelé radio-isotope (Cassol et al., 2018 ; Banich & Compton, 2018). Les traceurs les plus répandus sont le fluorodésoxyglucose (^{18}FDG) et l'eau marquée à l'oxygène 15 (H_2O^{15}). La TEP est particulièrement utilisée pour étudier le fonctionnement des neurotransmetteurs (comme la dopamine par exemple), mais aussi pour examiner comment le cerveau utilise certaines molécules (dans le cas où celles-ci peuvent avoir une version radioactive comme l'oxygène et le glucose). Une dernière utilité de la TEP, celle qui nous intéresse particulièrement, est qu'elle peut nous donner des informations sur le niveau du métabolisme cérébral. En effet, pour fonctionner correctement, le cerveau utilise de l'oxygène, ainsi que du glucose qui transitent tous les deux dans le réseau sanguin et qui peuvent donc être mesurés

grâce à la TEP (Banich & Compton, 2018). Les études récentes suggèrent que cette technique présente une très bonne sensibilité dans la reconnaissance d'un ECM, elle permet d'améliorer grandement le diagnostic et le pronostic des patients et ce, peu importe l'origine de la lésion cérébrale (Stender et al., 2014, 2016).

La dernière technique est l'électroencéphalographie (EEG). Elle permet de mesurer l'activité cérébrale grâce à des électrodes placées sur le crâne (Banich & Compton, 2018). Chaque électrode mesure un potentiel électrique, qui est un signal correspondant à la superposition des champs électriques post-synaptiques de neurones similaires (Banich & Compton, 2018). Chaque signal a une amplitude et une fréquence particulière et ces deux mesures permettent de définir l'état d'une personne. Par exemple, lorsqu'on est endormi, on présente principalement des signaux de basses fréquences, ce qu'on appelle une activité delta (Banich & Compton, 2018). La méthode d'EEG à haute densité au repos, moins coûteuse et plus simple d'utilisation que l'IRM et la TEP est capable de réduire le taux de mauvais diagnostics lorsqu'elle est utilisée en complément des échelles comportementales (Chennu et al., 2017).

Grâce à l'utilisation de ces dernières technologies de neuro-imagerie multimodale, le corps médical bénéficie d'outils performants pour étudier le fonctionnement du cerveau humain en exploitant les informations variées fournies par chaque modalité, offrant ainsi des résolutions temporelles et spatiales différentes (Rajkumar et al., 2021). Cette intégration multimodale permet d'ouvrir la voie vers la compréhension des physiopathologies, ainsi que de développer de nouveaux biomarqueurs pour le diagnostic et le traitement des ECA.

L'étude des réseaux neuronaux de la conscience chez les patients en ECA est donc primordiale afin d'affiner leur diagnostic. C'est dans ce contexte que l'équipe du Centre du Cerveau du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Liège et l'équipe du GIGA-Consciousness de l'Université de Liège ont mis en place un projet ayant pour but de créer une base de données contrôles en recueillant les données de neuro-imagerie (IRM-TEP-EEG) d'un grand nombre de sujets sains et ainsi avoir des données normatives sur les nouveaux équipements. L'objectif final de ce projet est donc de collecter des données de référence auxquelles seront comparées celles des patients en ECA examinés au CHU, ce qui permettra d'améliorer l'évaluation et le diagnostic de leur niveau de conscience.

3. Langage et conscience

3.1. *En éveil post-coma*

Un aspect très important à prendre en considération lors de l'évaluation du niveau de conscience des patients concerne la préservation des capacités langagières. En effet, si le patient ne répond pas à la commande, c'est peut-être parce qu'il ne la comprend pas et non pas parce qu'il est inconscient. Des difficultés langagières non reconnues peuvent ainsi conduire à une sous-estimation du niveau de conscience (Aubinet et al., 2022; Majerus et al., 2009). De plus, l'évaluation des capacités linguistiques résiduelles conduit à une meilleure caractérisation de leur profil, ce qui permet aux cliniciens une meilleure préparation des programmes de revalidation (Aubinet et al., 2018).

Des études de TEP au repos ont d'ailleurs montré que la récupération du métabolisme des régions neuronales associées à la conscience de soi et au traitement du langage coïncidait avec la réapparition de signes de conscience liés au langage tels que la réponse à la commande (Aubinet et al., 2019). Le fonctionnement cérébral du réseau langagier serait donc le principal pilier de la récupération des capacités de communication (Aubinet et al., 2020).

Certaines études ont également mis en évidence une relation entre la complexité des traitements langagiers et le niveau de conscience, notamment via des paradigmes EEG. Par exemple, les réponses cérébrales aux stimuli langagiers les plus complexes (ex : les phrases par rapport aux mots) seraient celles permettant le mieux de distinguer les patients ENR des patients ECM (Gui et al., 2020). De plus, Gui et ses collègues ont démontré que les données EEG obtenues à partir de ces différents paradigmes d'écoute passive de stimuli langagiers se sont révélées robustes pour prédire l'évolution des patients. Sur un total de 104 patients atteints d'ENR, d'autres auteurs ont par ailleurs pu constater chez 15% d'entre eux une activation cérébrale en réponse à des instructions verbales (« ouvrez et fermez votre main droite » et « arrêtez d'ouvrir et de fermer votre main droite »), alors qu'aucune réponse comportementale n'avait été constatée (Claassen et al., 2019). À nouveau, une meilleure récupération fonctionnelle a été mise en évidence chez les patients comportementalement non répondants avec une activation cérébrale préservée en réponse à ce type de commandes verbales, en comparaison aux autres patients ENR (Eggebike et al., 2022). De manière générale, des capacités langagières implicites résiduelles (activations cérébrales en réponse à des mots/phrases) ont été observées chez 33% des patients ENR, 50% des patients ECM- et 78% des patients ECM+. Les capacités langagières plus explicites (ex : suivi de commandes)

apparaissent quant à elles chez 20% des patients ENR, 33% des patients ECM- et 50% des patients ECM+ (Aubinet et al., 2022).

L'ensemble de ces études montre à quel point la conscience et le traitement langagier résiduels sont imbriqués chez les patients en éveil de coma. Dans la prochaine section, nous décrirons comment les différentes approches théoriques de la conscience tiennent compte du langage.

3.2. *Approches théoriques*

Quand nous examinons les diverses représentations théoriques de la conscience, nous constatons qu'elles rapportent également des liens entre langage et conscience. Tout d'abord, selon la GWT, la conscience permet de saisir de nouvelles informations, comme la compréhension de nouveaux mots (Baars, 2002). Selon Baars, il est essentiel d'être conscient afin d'intégrer différentes entrées sensorielles, probablement en utilisant des fonctions spécialisées indispensables pour le traitement du langage. Les théories HOT considèrent que le rapport verbal de la conscience est la norme de référence pour démontrer que l'on est dans un état conscient (Brown et al., 2019). Si on ne peut exprimer cette conscience, on ne pourrait donc pas se considérer comme étant dans un état de conscience de haut niveau. Enfin, selon Tononi et al. (2016), l'IIT fait une distinction entre la conscience phénoménale (le vécu d'une expérience) et la conscience d'accès (ce qui peut être exprimé verbalement). D'après ces chercheurs, la conscience phénoménale a une capacité plus grande que la conscience d'accès. En effet, selon ces derniers, il est difficile de rapporter certaines caractéristiques phénoménales car elles évoluent rapidement et peuvent être oubliées avant d'être récupérées. Contrairement aux théories HOT, il est postulé ici qu'il serait donc possible d'être conscient de vivre une expérience même si on ne peut pas l'exprimer verbalement. Ces différentes théories actuelles de la conscience (voir Seth & Bayne, 2022 pour une revue) considèrent donc le langage comme un « output » conscient parmi d'autres, ou comme l'une des fonctions de la conscience.

Dans la même lignée, la théorie de Peper postule que la conscience ferait partie d'un mécanisme d'adaptation du corps (Peper, 2020). Selon lui, les pensées sont le résultat de l'activité cognitive neuronale sur l'environnement extérieur et celles-ci sont converties en images sensorielles puisque le monde est exprimé par les sens. Cette conversion rend les images sensorielles compréhensibles, conscientes et donc communicables via le langage. Il ajoute que notre activité neuronale inconsciente peut devenir consciente via l'expression des images sensorielles (Peper, 2022). Les images sensorielles seraient donc à la fois le canal permettant

de rendre le résultat cognitif conscient, mais aussi la source de notre activité cognitive. Sans cette activité cognitive, nous ne pourrions donc pas être conscients.

Daniel Dennett, quant à lui, affirme que le langage est un outil naturel qui a évolué pour la communication. Une fois cet outil établi, l'apparition du langage a permis la modification de l'accès à l'information dans le cerveau humain, ce qui a été crucial pour l'évolution de la conscience humaine (tel que cité dans Miguens, 2022). Il développe que les mots sont des outils de pensées, engendrant des esprits capables de s'auto-critiquer, s'apprécier, s'apaiser, de faire des affirmations engagées, etc. Il considère donc ces différents phénomènes comme étant essentiels pour la vie mentale consciente caractéristique des humains.

De plus, le langage faciliterait les fonctions exécutives en nous permettant d'avoir accès à des niveaux plus élevés de représentation et de réflexion sur les informations pertinentes à notre tâche en cours, en nous aidant à réguler notre comportement, en offrant une distance par rapport au contexte immédiat, en redirigeant l'attention, ainsi qu'en nous poussant à créer des représentations abstraites du problème (revue de Miller, 2022).

Selon Skipper (2022), le langage – par l'intermédiaire du discours interne – nous permettrait d'avoir accès à la conscience de haut niveau. Il explique que la nature sociale du langage nous permet de raisonner sur l'état d'esprit des autres, mais aussi d'avoir des pensées sur nous-mêmes, contrairement aux animaux. De plus, le fait de nous parler à nous-mêmes nous permettrait de réévaluer les appréciations que nous recevons des autres, mais aussi de créer une certaine distance entre les informations que nous avons sur nous-mêmes et notre propre personne grâce au mécanisme de redondance créé par le discours interne (Morin, 1993). Le mécanisme de redondance fait ici référence au principe d'amener des informations déjà connues sous une nouvelle forme – le discours interne. Le fait de se parler à soi-même nous permettrait ainsi de prendre conscience de nos croyances, attitudes, traits de personnalités, etc. (Morin & Everett, 1990).

La présence de traitement langagier inconscient peut toutefois s'observer chez des sujets sains. Au cours d'une recherche sur le traitement cérébral des mots masqués, certains auteurs ont observé que, lorsque les participants étaient confrontés à un choix forcé, leurs résultats étaient supérieurs à celui du hasard (Dehaene et al., 2001). De plus, ils ont constaté que les mots masqués activaient les mêmes régions de traitement langagier que les mots non masqués, mais que ces derniers impliquaient, en plus des réseaux bien connus du langage, les régions préfrontales et pariétales. Ces résultats démontrent que des stimuli langagiers peuvent être traités, même lorsque nous n'en avons pas conscience.

4. Expériences intérieures et langage

Parmi les expériences intérieures que nous pouvons vivre quotidiennement, nous retrouvons les pensées, les sentiments, les sensations, etc. En 2008, Heavey & Hurlburt se sont intéressés à cinq différents types d'expériences intérieures : le discours interne, l'imagerie mentale visuelle (voir quelque chose dans l'imagination sans que cela ne soit présent), la pensée non symbolique (pensée qui n'est pas représentée sous forme de mots, d'images ou d'autres symboles), les sentiments et la conscience sensorielle (prêter attention à un aspect sensoriel particulier de l'environnement). Dans leur article, ces chercheurs ont quantifié ces différents types d'expériences intérieures via la méthode d'échantillonnage d'expériences descriptives (*Descriptive Experience Sampling* – DES). Via cette technique, les participants accomplissent leurs tâches quotidiennes et sont invités à décrire les expériences qu'ils vivaient lorsque l'appareil émet un bip sonore (Heavey & Hurlburt, 2008). Par la suite, les participants devaient classer leurs différentes expériences intérieures dans l'une des catégories décrites ci-dessus. La catégorie d'expériences intérieures la plus fréquente s'est avérée être l'imagerie mentale visuelle, avec une fréquence moyenne de 34%, suivie du discours interne et des sentiments à 26%, et enfin de la pensée non symbolique et de la conscience sensorielle à 22%.

Les expériences intérieures peuvent également être étudiées via la passation de questionnaires rétrospectifs. Par exemple, Delamillieure et collègues (2010) ont évalué la prévalence de cinq activités mentales : l'imagerie mentale visuelle, le discours interne, l'imagerie mentale auditive (s'imaginer ou se souvenir de mots/phrases), la conscience somatosensorielle, l'expérience musicale intérieure et le traitement mental des nombres. Les auteurs ont ici évalué les différents types d'expériences intérieures via des questionnaires semi-structurés qu'ils ont fait remplir aux participants suite à leur passage dans une IRM lors de laquelle il leur était simplement demandé de fermer les yeux et de laisser leurs pensées aller et venir. En moyenne, les participants, lors de l'IRM, consacraient 40 % de leur temps à l'activité mentale de « l'imagerie mentale visuelle », 30% pour le discours interne, 19% pour la conscience somatosensorielle, 23% pour l'expérience musicale intérieure et 12% pour le traitement mental des nombres (Delamillieure et al., 2010).

4.1. *Le vagabondage de l'esprit*

Lorsque nous accomplissons des tâches quotidiennes diverses ou lorsque nous sommes engagés dans une tâche cognitive, notre esprit peut s'échapper de notre activité actuelle pour se

focaliser sur des pensées ou des images intérieures qui ne sont pas liées à la situation actuelle. Par exemple, nous pourrions nous remémorer des souvenirs du passé, nous projeter dans le futur, ou penser à ce que nous vivons actuellement. Ce genre de pensées est communément désigné sous le nom de vagabondage de l'esprit (Stawarczyk et al., 2012) et est caractérisé par des pensées indépendantes des stimuli et non liées à la tâche (Stawarczyk et al., 2011). Il y aurait quatre facteurs structurant les dimensions phénoménologiques du vagabondage : la façon dont les pensées sont représentées (le plus souvent sous forme de discours interne ou sous forme d'imagerie mentale), sa pertinence personnelle, son réalisme, ainsi que la façon dont il est structuré (quelles sont les séquences de pensées) (Stawarczyk et al., 2013). Lorsque nos pensées « vagabondent », elles sont fréquemment dirigées vers des buts personnels et sont principalement orientées vers le passé ou le futur, et plus particulièrement dans un futur proche (Andrews-Hanna et al., 2010; Stawarczyk et al., 2013). L'orientation temporelle de ces pensées module leur format de représentation, on observe par exemple que les pensées orientées vers le futur impliquent moins d'imagerie mentale et plus de discours interne que les pensées orientées vers le présent ou le passé (Stawarczyk et al., 2013).

D'un point de vue neuronal, le vagabondage de l'esprit implique l'activation du DMN, avec typiquement une augmentation de l'activité de ce réseau lorsque nous sommes engagés dans une tâche passive maximisant l'ennui (Andrews-Hanna et al., 2010). De plus, lorsque le vagabondage implique des pensées épisodiques dirigées vers le passé ou le futur, une association est observée entre le lobe temporal médian et le DMN (Andrews-Hanna et al., 2010).

4.2. *Discours interne et conscience intérieure*

Le discours interne est défini comme étant « l'expérience subjective du langage en l'absence d'une articulation ouverte et audible » (Alderson-Day & Fernyhough, 2015). Cette expérience peut être vécue de la même façon que lorsqu'on s'adresse à un interlocuteur, c'est-à-dire que l'on produit, écoute et ressent notre propre discours interne (Skipper, 2022). Cependant, cette voix est entendue à une certaine distance, comme étant étendue dans notre esprit, et elle nous permet d'être conscient de nos actions et d'être en alerte face à nos pensées (Skipper, 2022). Elle possède évidemment des qualités affectives venant de nos expériences passées qui influencent nos décisions et nous permettent d'orienter nos actions (Baars et al., 2003; McCarthy-Jones & Fernyhough, 2011; Skipper, 2022). Suivant la théorie de Vygotsky, le discours interne serait le résultat de l'internalisation progressive des échanges entre l'enfant et

son environnement, qui nous permettrait donc d'utiliser le langage non plus comme une manière de réguler le comportement des autres, mais plutôt pour réguler notre propre comportement, tout comme notre cognition (tel que cité dans Fernyhough & Borghi, 2023). Dans ce sens, le discours interne peut être compris comme un outil cognitif qui ne nécessite pas de contexte social cognitif, contrairement au langage parlé (Fernyhough & Borghi, 2023). Selon Fodor, l'esprit permettrait de composer des pensées complexes en réassemblant des représentations conceptuelles exprimées dans un langage symbolique intérieur, autrement dit, un langage de la pensée (tel que cité dans Frankland & Greene, 2020). La pensée utiliserait donc un système semblable à celui du langage parlé, mais les combinaisons et recombinaisons des représentations conceptuelles dans notre esprit permettraient d'avoir des pensées plus complexes que ce que nous sommes capables d'exprimer.

Concernant les caractéristiques de ce discours interne, nous pouvons retrouver différents points de vue dans la littérature. Certains auteurs estiment qu'il est le résultat d'une stimulation mentale du langage parlé, en l'absence des actions articulatoires nécessaires pour générer un discours audible (Corley et al., 2011), tandis que d'autres considèrent que la production du discours interne est plus abstraite et est indépendante des processus articulatoires (Bermúdez, 2018). En réalité, il semblerait que la production du discours interne soit non seulement le résultat d'une simulation mentale du langage parlé, mais qu'il se présente également de façon abstraite (Fernyhough & Borghi, 2023). En effet, une étude a démontré qu'il peut se présenter sous une forme plus condensée et moins riche que le langage parlé (Alderson-Day et al., 2018), tandis que d'autres résultats suggèrent que lorsque nous nous parlons à nous-mêmes via le langage intérieur, nous activons les muscles articulatoires (Nalborczyk et al., 2020).

Le discours interne remplit également plusieurs fonctions. Il aiderait notamment au contrôle attentionnel (Nedergaard et al., 2023), il améliorerait la manipulation intérieure des représentations orientée vers des objectifs, renforcerait la flexibilité (Granato et al., 2020), améliorerait la mémoire (Mitsuhashi et al., 2018) et nous permettrait d'explorer et de contrôler nos expériences (Fernyhough & Borghi, 2023).

Dans toute la complexité de la conscience, on peut en distinguer deux niveaux qui sont la conscience de soi dite « primaire » et la méta-conscience de soi (Morin, 2006). Lorsque notre attention se concentre sur ce qu'il se passe dans notre milieu intérieur, on parle de conscience de soi, c'est-à-dire que nous sommes l'objet de notre propre attention, tout en intégrant des informations sur nous-mêmes. Par exemple, cela se produit lorsque nous pensons au fait que nous sommes stressés. C'est lorsque nous prenons conscience que nous sommes conscients de

nous-mêmes que nous pouvons parler de méta-conscience de soi ou de conscience d'ordre supérieur (Morin, 2006). En d'autres termes, ce niveau implique la conscience que nous sommes engagés dans de l'auto-observation. Pour reprendre l'exemple du stress, nous pourrions nous dire à nous-mêmes que nous sommes en train d'analyser nos émotions. Selon Morin (2006), la méta-conscience de soi ne serait pas possible sans langage intérieur. En effet, ce type particulier de langage permettrait de traiter et de stocker nos propres informations, que cela soit sur notre état mental ou physique, mais aussi d'identifier nos comportements passés et présents.

Dans leur étude, Verhaeghen & Mirabito (2021) ont étudié l'influence du langage intérieur sur la conscience de soi via la passation de différentes échelles. Les auteurs distinguent la conscience passive de la conscience réflexive. La conscience passive fait référence à une attitude de pleine conscience caractérisée par une acception et une observation sans jugement des expériences intérieures, favorisant une conscience calme, tandis que la conscience réflexive (ou active) fait référence à une introspection intentionnelle et une exploration approfondie de nos pensées et sentiments (Verhaeghen & Mirabito, 2021). Les auteurs ont pu mettre en évidence d'un côté le fait que les individus les plus activement conscients utilisent le discours interne le plus souvent à des fins fonctionnelles (régulation de la mémoire, guidance de l'action, résolution de problèmes, etc.). De l'autre côté, la conscience passive impliquerait une utilisation diminuée du discours interne suggérant que, lorsque les individus s'engagent dans l'observation de leur réalité, il y a un désengagement du discours interne.

Certains auteurs se sont aussi intéressés aux relations entre les différents processus liés à la conscience intérieure, tels que le discours interne, la clarté du concept de soi (ex : mes croyances à propos de moi-même sont souvent en conflit les unes avec les autres), la pleine conscience (ex : être bien conscient des pensées qui nous traversent l'esprit), le vagabondage de l'esprit et l'auto-régulation (Racy & Morin, 2024). Un aspect important dans cet article est que l'une des échelles utilisées fait la distinction entre la pleine conscience et l'acceptation de la pleine conscience. En effet, la pleine conscience fait référence au concept de conscience de nos pensées, tandis que l'acceptation fait référence à notre ressenti par rapport au contenu de nos pensées (ex : il y a des aspects de moi-même auxquels je ne veux pas penser – échelle inversée). Les auteurs ont notamment pu mettre en évidence une relation positive entre le discours interne et le vagabondage de l'esprit, mais aussi avec la pleine conscience. Cependant, le discours interne était négativement corrélé avec l'acceptation de la pleine conscience. Ces résultats laissent entendre que la pleine conscience nécessite l'utilisation du discours interne,

tandis que son acceptation serait un processus potentiellement plus passif qui ne nécessite pas autant de discours interne.

Qu'en est-il des patients souffrant d'aphasie ? Est-ce que leur potentielle incapacité à utiliser le discours interne implique qu'ils ne présentent pas de méta-conscience ? En effet, la perte de leurs capacités langagières entraînerait un appauvrissement du discours interne, ce qui serait lié à une altération des capacités de métacognition et de conscience de soi (Langland-Hassan et al., 2017). Si l'on s'intéresse aux patients atteints d'aphasie suite à un accident vasculaire cérébral (AVC), une étude a mis en évidence des difficultés d'évaluations métacognitives de leur réussite dans une tâche de catégorisation, en comparaison à un groupe contrôle (Langland-Hassan et al., 2017). Ces résultats mettent en évidence un lien entre le langage, le discours interne et une certaine forme de métacognition. Chez les patients aphasiques post-AVC, des stratégies de récupération métacognitive sont d'ailleurs proposées pour améliorer les capacités langagières. L'idée derrière celles-ci est que le fait d'aider les patients à être conscients de leurs forces et de leurs faiblesses leur permettrait d'allouer les ressources nécessaires à leur récupération, ce qui in fine augmenterait leur fonctionnement global (Wadams et al., 2022).

Bien que le discours interne semble universel et omniprésent, certains individus ne rapportent toutefois aucune expérience de langage intérieur, phénomène que certains auteurs ont proposé d'appeler l'« anendophasie » (Nedergaard & Lupyan, s. d.). Nedergaard et Lupyan se sont particulièrement intéressés à ce phénomène et ont observé que l'anendophasie est souvent accompagnée de performances plus faibles en mémoire de travail verbale, tout comme des difficultés à effectuer des jugements de rimes sur base d'images. Malgré les effets comportementaux de l'absence de discours interne, ce phénomène passe bien souvent inaperçu, ce qui suggère que les personnes avec anendophasie utilisent des stratégies alternatives au discours interne, telles que par exemple le fait de se parler à soi-même à voix haute ou utiliser d'autres stratégies que la répétition mentale en tâche de mémoire de travail (ex : ne mémoriser que les premières lettres de chaque mot lorsqu'il faut retenir une suite de mots) (Nedergaard & Lupyan, s. d.).

Après avoir examiné en détail les diverses expériences intérieures, il est temps de nous pencher sur les techniques de neuro-imagerie qui rendent possible l'étude de ces phénomènes, ainsi que de la conscience elle-même.

5. Neuro-imagerie de la conscience et des expériences intérieures

5.1. *Les réseaux neuronaux de la conscience*

Le système neuronal de la conscience se situe à la fois dans les réseaux corticaux et sous-corticaux (Blumenfeld, 2016). Plus précisément, le mésencéphale, le pont supérieur, le thalamus, l'hypothalamus et le cerveau antérieur basal sont les structures sous-corticales contribuant au maintien de la vigilance (voir Figure 2). Les réseaux corticaux de la conscience sont plus étendus et sont composés de cortex associatifs dans les deux hémisphères, en particulier dans le lobe frontal latéral, l'insula antérieure, le cortex pariétal latéral, frontal médian, pariétal médian, mais aussi le cortex cingulaire. Ces réseaux corticaux sont composés de zones sensorimotrices qui contribuent à la perception des différents contenus de la conscience. De plus, ces régions corticales contribuent également au maintien de la vigilance et de l'attention (Blumenfeld, 2016). Le cortex préfrontal médian (CPFM), le cortex pariétal médial, ainsi que le cortex temporo-pariétal latéral nous permettraient également d'adopter une perspective à la première personne, impliquant la conscience de notre corps, ainsi que l'interaction entre notre corps et l'environnement (Vogeley & Fink, 2003).

La recherche en neuro-imagerie sur l'éveil de coma a notamment axé ses efforts sur l'exploration de l'activité cérébrale lors de périodes de "repos" lors desquelles les sujets ne sont pas soumis à des stimulations extérieures. Ce paradigme permet notamment l'étude du DMN (Heine et al., 2012; Mazoyer et al., 2001). Les principales régions cérébrales soulevées par ces études sont le précunéus, le cortex cingulaire postérieur (CCP), antérieur, ainsi que les zones de jonctions temporo-pariétales (voir Figure 3).

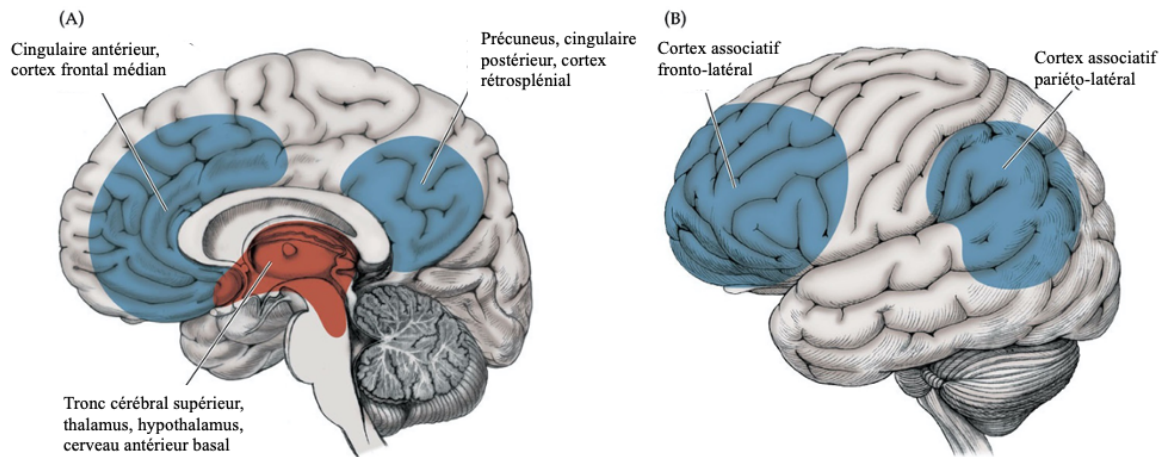


Figure 2. Système de conscience. (A) Vue médiale montrant les structures corticales en bleu et sous-corticales en rouge. (B) Composantes latérale du système cortical de conscience. (image adaptée de Blumenfeld, 2016).

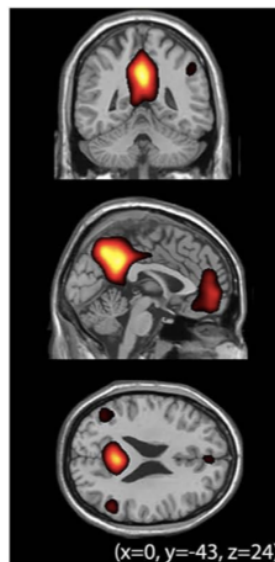


Figure 3. Coupe coronale, sagittale et axiale des réseaux neuronaux du mode par défaut chez les sujets contrôles. (image adaptée de Heine et al., 2012).

Dans leur étude, Thibaut et al. (2021) ont plus récemment combiné différentes techniques de neuro-imagerie afin d'étudier les caractéristiques cérébrales des patients en ECM et ENR. Plus précisément, ils ont calculé la valeur d'absorption normalisée (*Standardised Uptake Value*, SUV) pour chaque sujet suite à la TEP. Ils ont également recueilli les données d'un EEG haute densité sur base desquelles ils ont évalué la connectivité cérébrale. Enfin, une analyse de morphométrie basée sur les voxels a été réalisée suite à l'IRM afin de quantifier le volume de matière grise dans les gyri temporaux et inférieurs droits. Les patients souffrant d'ECM* ont montré une activité plus intense dans les gammes de fréquences thêta et alpha, une activité réduite dans la gamme delta, un coefficient de participation alpha plus élevé (intégration) et un degré alpha (connectivité) plus élevé dans l'ensemble du cerveau, ainsi que

dans les régions frontales et pariétales, par rapport aux patients ENR. Des atrophies moins sévères dans la région temporale frontale droite, le gyrus fusiforme et l'insula ont été observées chez les patients ECM*. Par contre, par rapport aux patients ECM*, les patients atteints d'ECM présentaient un métabolisme du glucose plus élevé dans les régions postérieures droites du cerveau et une connectivité plus élevée dans la gamme de fréquences thêta dans l'hémisphère gauche, bien qu'aucune différence dans l'atrophie de la matière grise n'ait été observée.

Malgré des différences majeures qui peuvent être observées entre les différents états de conscience, certaines caractéristiques neurophysiologiques sont communes au sommeil profond, à l'anesthésie générale, à l'ENR ou au coma, ainsi qu'à la perte de conscience lors d'une crise épileptique : un hypométabolisme des régions frontopariétales, une connectivité fonctionnelle bloquée entre les régions corticales, mais aussi entre le thalamus et le cortex, ainsi qu'une absence de réactivité aux stimuli normalement conscients (Baars et al., 2003).

5.2. *Conscience intérieure et connexion à l'environnement*

Les composantes de la conscience correspondant à la connexion à l'environnement et à la conscience intérieure évoquées précédemment (Martial et al., 2020) sont sous-tendues par des réseaux cérébraux distincts, dont l'activité serait négativement corrélée (Vanhaudenhuyse et al., 2011). En effet, il y aurait une corrélation positive entre l'activité des régions du CCP, du cortex cingulaire antérieur et des cortex parahippocampiques avec l'intensité de la conscience de soi (pensées liées à l'expérience autobiographique et discours interne), tandis que la conscience de l'environnement (audition, somesthésique, olfaction, vision) serait corrélée positivement avec le gyrus frontal inférieur, ainsi que le lobe pariétal inférieur (voir Figure 4) (Vanhaudenhuyse et al., 2011). De plus, Vanhaudenhuyse et collègues (2011) ont pu observer que le contenu de la pensée spontanée était le plus souvent autobiographique et se référait à des images mentales.

5.3. *Imagerie mentale visuelle*

Plusieurs régions cérébrales semblent jouer un rôle important dans la construction de l'imagerie mentale visuelle (pour une revue, voir Pearson et al., 2015). La formation ou la manipulation d'une image mentale semble impliquer une activité dans les zones frontales. Cette activité, indépendante du contenu précis de l'image, suggère que les zones frontales jouent un rôle d'organisation dans l'imagerie mentale visuelle (Schlegel et al., 2013). De plus, l'hippocampe jouerait un rôle dans la construction mentale des scènes en assurant leur

cohérence spatiale (Bird et al., 2010). Les études d'imagerie cérébrale montrent que les représentations des images mentales et perceptuelles se ressemblent dès le cortex visuel primaire (CVP). Le cortex primaire traiterait les images mentales et perceptuelles à travers un ensemble commun de caractéristiques visuelles (Pearson et al., 2015). Enfin, le DMN jouerait également un rôle dans l'imagerie mentale, en nous permettant de construire et déconstruire des images mentales abstraites (Schlegel et al., 2013).

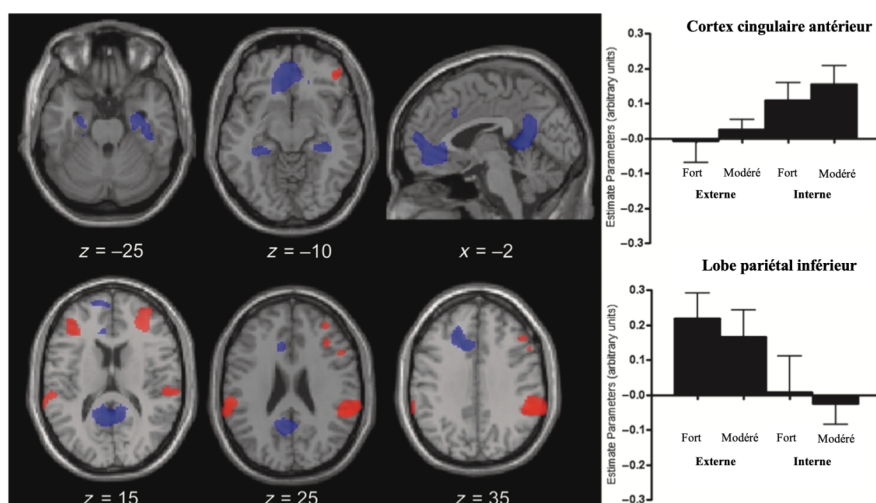


Figure 4. Régions cérébrales montrant une corrélation entre le signal BOLD et l'intensité des scores de conscience intérieure et extérieure. Zones bleues = cortex cingulaire antérieur; cortex cingulaire postérieur; cortex parahippocampiques. Zones rouges = lobe pariétal inférieur bilatéral et cortex préfrontaux dorsolatéraux. (image adaptée de Vanhaudenhuyse et al., 2011).

5.4. Langage et discours interne

Dans les conceptions classiques du langage, l'aire de Broca était considérée comme étant la région traitant la production du langage et l'aire de Wernicke comme étant la région traitant la compréhension du langage (Flinker et al., 2015; Overath et al., 2015). Les conceptions actuelles considèrent le langage comme fonctionnant sous forme de réseau et non pas comme le résultat d'activations cérébrales distinctes (Banich & Compton, 2018a). Le traitement langagier repose sur deux flux d'informations (Friederici & Gierhan, 2013). Tout d'abord, le flux dorsal transforme les informations linguistiques en un flux articulatoire. Ensuite, le flux ventral transforme ces informations afin d'en attribuer une signification (Banich & Compton, 2018b). Plusieurs voies contribuant au traitement langagier peuvent également être décrites (voir Figure 5). Les aires cérébrales impliquées dans le langage comprennent un large réseau fronto-pariéto-temporal, principalement latéralisé à gauche (Banich & Compton, 2018b).

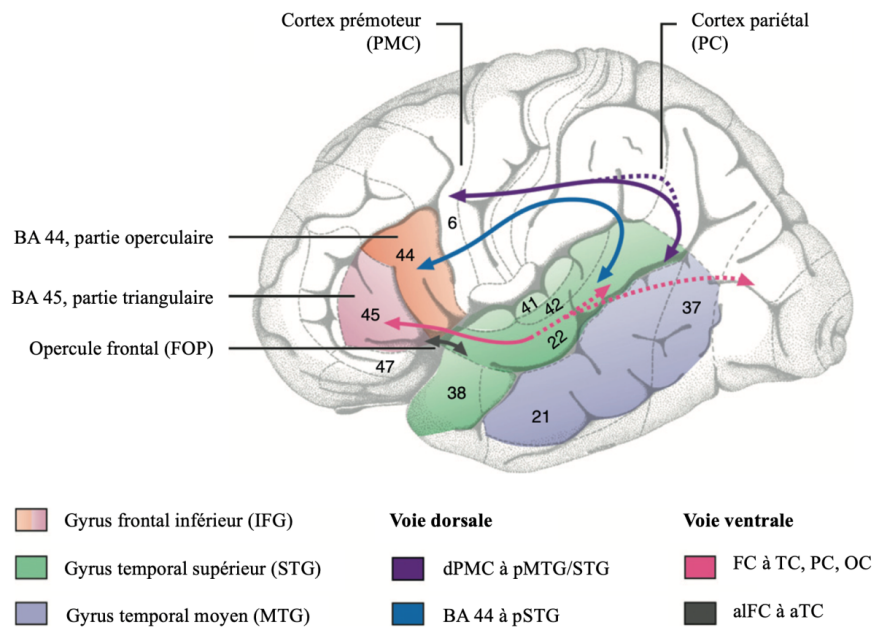


Figure 5. Réseaux neuronaux du langage. Mauve = voie permettant aux informations auditives langagières d'alimenter les régions prémotrices afin d'aboutir à la production du langage (articulation). Bleue = voie permettant d'exercer des processus exécutifs sur la matériel linguistique et facilite le traitement d'une structure syntaxique complexe. Rose = voie permettant de faire des liens entre la phonologie, la sémantique et la signification des mots. Grise = voie supportant la construction et la compréhension des phrases simples. (image adaptée de Friederici & Gierhan, 2013)

Le langage intérieur est lié à une activation des régions frontales inférieures (du gyrus frontal inférieur notamment, qui correspond à l'aire de Broca) (Morin, 2011), des régions temporales postérieures, ainsi que des régions pariétales (gyrus supramarginal) (Alderson-Day & Fernyhough, 2015). Peu d'études ont cependant étudié les réseaux neuronaux du langage intérieur et encore moins en lien avec la conscience (Skipper, 2022).

5.5. Rôle du réseau du mode par défaut

Il est maintenant connu que le DMN intervient dans plusieurs processus mentaux. Il serait notamment impliqué dans les processus auto-référentiels (Bonhage et al., 2016). Plus précisément, le CCP serait responsable de l'initiation de ces processus, tandis que le CPFM jouerait plutôt un rôle de modérateur (Davey et al., 2016). De plus, certains résultats suggèrent que l'activité de ce réseau serait nécessaire mais pas suffisant pour soutenir la conscience (Demertzi et al., 2015; Norton et al., 2012). En effet, Norton et collègues (2012) ont pu observer une activité préservée de ce réseau chez les patients ayant pu récupérer une conscience, mais pas chez les patients ECA. Au même titre que les réseaux fronto-pariétaux, auditifs, sensorimoteurs et visuels, l'activité du DMN serait capable de discriminer les patients ECM des patients ENR (Demertzi et al., 2015). Enfin, cette activité semble également sous-tendre le vagabondage mental (Zhou & Lei, 2018). L'activation dans les régions médiales préfrontales

du DMN a été associée avec des mesures auto-rapportées de vagabondage mental, mais aussi avec des mesures comportementales indépendantes (erreurs de performance sur la tâche) (Christoff et al., 2009). L'étude de Christoff et collègues (2009) a également observé une activité neuronale accrue du DMN et des réseaux exécutifs (notamment que le cortex préfrontal dorsolatéral - CPFDL) lorsque les sujets n'étaient pas conscients de leur vagabondage mental, ce qui laisse penser que le vagabondage est le plus prononcé lorsque les sujets n'en sont pas conscients (lorsqu'ils manquent de méta-conscience).

En résumé, notre examen de la littérature a permis de mettre en lumière plusieurs réseaux corticaux clés. En premier lieu, nous avons identifié le réseau fronto-pariétal, incluant le cortex cingulaire, comme étant essentiel à la perception de différents contenus de la conscience, ces zones étant liées à des fonctions sensorimotrices contribuant à la perception de différents contenus de la conscience. Par ailleurs, le CPFM joue un rôle crucial en nous permettant d'adopter une perspective à la première personne et d'avoir une conscience de notre corps. Les travaux de Vanhaudenhuyse et al., 2011 ont révélé une distinction entre les réseaux neuronaux impliqués dans la conscience interne et externe : la conscience interne est associée au CCP, faisant partie du DMN, tandis que la conscience externe est liée au réseau fronto-pariétal droit. L'imagerie mentale visuelle semble activer le CVP, tandis que le discours interne engage principalement le réseau fronto-pariétal gauche, semblable au réseau impliqué dans le langage. Enfin, le DMN est particulièrement actif lors des processus auto-référencés, soulignant son rôle central dans les expériences de conscience orientées vers l'intérieur.

Objectifs et hypothèses

1. Objectifs

Pour rappel, ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet plus large de création d'une base de données contrôles destinées à l'évaluation des patients en ECA. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'explorer l'activité des réseaux neuronaux sous-tendant les expériences intérieures de sujets sains conscients, et notamment leur discours interne. Quatre caractéristiques des expériences intérieures sont évaluées. Tout d'abord, nous nous intéressons à l'orientation des pensées, c'est-à-dire est-ce qu'elles sont plutôt orientées vers l'intérieur (soi-même) ou vers l'environnement ? Ensuite, nous nous intéressons à la forme que peuvent prendre les pensées, c'est-à-dire est-ce que les pensées se présentent plutôt sous forme de discours interne ou de représentations visuelles ?

Nous souhaitons donc apporter une approche multidimensionnelle à ce phénomène d'expériences intérieures conscientes en utilisant l'IRMf et la TEP pour une évaluation multimodale des réseaux neuronaux actifs au repos. De plus, les questionnaires proposés offrent une évaluation quantitative du temps que les participants consacrent à ces différentes expériences intérieures.

2. Hypothèses

Les analyses présentées dans le cadre de ce mémoire sont grandement exploratoires. Cependant, sur base des données présentées dans l'introduction, nous pouvons tout de même avancer plusieurs hypothèses. Tout d'abord, nous nous attendons à ce que les participants présentent une forme de pensée dominante, ce qui serait reflété par une corrélation négative entre les scores de discours interne et les scores d'imagerie mentale visuelle. De plus, nous nous attendons à ce que les scores de discours interne soient corrélés positivement avec l'activité du réseau fronto-pariétal gauche (lié au traitement langagier) et que les scores d'imagerie mentale visuelle soient corrélés positivement avec l'activité des aires occipitales. Finalement, nous nous attendons à confirmer les résultats de Vanhaudenhuyse et ses collègues (2011), avec d'un côté une plus grande activation du CCP ainsi que des aires parahippocampiques lorsque les participants s'engagent dans des pensées liées à eux-mêmes et de l'autre côté, une plus grande activation du cortex fronto-pariétal latéral (CFPL) lorsque les pensées des participants sont plutôt orientées vers l'environnement.

Méthodologie

1. Participants

Les participants ont été recrutés sur base de journées de recrutement organisées au CHU de Liège ou via la distribution de flyers. Tous les participants ont été rémunérés suite à leur participation. Cette étude a été validée par le comité d'éthique du CHU de Liège. Le consentement écrit a été obtenu auprès de tous les participants.

Afin de s'assurer de la bonne santé physique et mentale des participants, nous leur avons administré plusieurs questionnaires lors d'une phase de pré-screening, qui a eu lieu par téléphone ou visioconférence, suivie d'une phase de screening par laquelle débute la journée d'évaluations.

La tranche d'âge des participants inclus va de 18 à 80 ans. Ils doivent être francophones, présenter une bonne santé générale, une absence de troubles neurologiques et psychiatriques, et ne pas être soumis à une médication pouvant influencer l'étude. Plusieurs autres critères de santé généraux doivent être respectés : une vision et audition préservée ou corrigée et un indice de masse corporelle entre 18,5 et 34,9. La liste complète des critères d'inclusion et d'exclusion se trouve dans l'Annexe A.

2. Matériel

2.1. *Screening*

Lors de la phase de pré-screening, les participants âgés de plus de 55 ans sont soumis à la MoCa (version téléphone) qui a pour objectif de déceler une déficience cognitive, même légère (www.mocatest.org) (Wong et al., 2015). Un score égal ou inférieur à 18 à ce test entraîne l'exclusion du participant.

Le jour de l'acquisition des données, les derniers tests permettant de vérifier les critères d'inclusion sont réalisés. Il y a tout d'abord l'échelle d'évaluation de la démence de Mattis qui évalue le fonctionnement cognitif du patient (Mattis, 1988). Un score inférieur à 130 entraîne l'exclusion du patient. Ensuite, l'inventaire de Beck pour l'anxiété (Freeston et al., 1994) ainsi que celui pour la dépression (Beck et al., 1996) sont également administrés. Un score supérieur à 17 à l'un de ces deux tests entraîne également l'exclusion du patient.

2.2. *Expériences intérieures*

Il est enfin demandé aux participants de répondre à un questionnaire ayant pour but d'évaluer leurs expériences intérieures. Ce questionnaire est composé de 19 items, évaluant différentes activités mentales (voir Annexe B). Pour chaque item, le participant évalue son expérience sur une échelle de 0 (aucun moment pendant la séance) à 10 (durant toute la séance).

3. Procédure

La phase de pré-screening a d'abord eu lieu par téléphone ou visio-conférence. Elle permet de s'assurer que la plupart des critères d'inclusion soient bien remplis (cf. tests et questionnaires décrits dans la section 2.1.), mais aussi que le participant ait bien compris son implication dans cette étude. A la fin de l'entretien, une date est convenue avec le participant pour la réalisation des différentes évaluations.

Au début de la journée d'évaluation, l'étude est à nouveau expliquée au participant, à qui il est demandé de lire et signer les documents d'information et de consentement. Les derniers tests et questionnaires de screening (cf. section 2.1.) sont administrés. Outre ces évaluations destinées à vérifier la correspondance des participants aux critères d'inclusion de la base de données contrôles, d'autres tests sont réalisés pour contrôler plusieurs éléments susceptibles d'influencer l'activité des réseaux de la conscience (voir Annexe C).

3.1. *Evaluations de neuro-imagerie*

IRMf. Une fois les étapes de pré-screening et de screening passées, le participant est amené à passer un examen IRM. Parmi les différentes séquences acquises lors de l'IRM, certaines sont de nature structurelle, tandis qu'une séquence fonctionnelle est obtenue grâce à l'imagerie BOLD. Lors de cette séquence BOLD, la consigne donnée au participant est la suivante : « Gardez les yeux ouverts, restez immobile et laissez vos pensées aller et venir librement. Laissez vos pensées divaguer comme vous le désirez ». Notre questionnaire d'expériences intérieures est réalisé directement à la suite de l'examen IRM.

Les images du cerveau entier ont été extraites à l'aide d'un scanner 3 Tesla (Magnetom Vida, Siemens Medical Solutions, Erlangen, Allemagne) situé au CHU de Liège. L'orientation de la coupe était transversale, couvrant 39 coupes, une taille de voxel de $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, un espace de 25% entre les coupes, une taille de matrice de $64 \times 64 \times 39$, un TR de 728 ms, un TE de 30 ms et un angle de rotation de 350° . Pour chaque sujet, 500 volumes fonctionnels ont été acquis. Les

images structurales des sujets ont également été obtenues en utilisant les séquences MP2RAGE, avec un TR de 2500 ms, un TE de 2.27 ms, un TI de 450 ms, une taille de matrice de 240x256x176 et une taille de voxel de 1x1x1 mm².

TEP. L'acquisition des données TEP suit les recommandations de L'Association Européenne de Médecine Nucléaire (Guedj et al., 2022). Au moins 15 minutes avant l'administration de fluorodésoxyglucose (¹⁸FDG), les patients doivent être installés dans une pièce calme et peu éclairée, tout comme pendant la phase d'absorption de ¹⁸FDG (au moins 20 minutes). Avant l'injection du traceur, la glycémie du sujet est vérifiée. Celle-ci doit se situer entre 80 et 120 mg/dl. Dans le cas où elle serait trop haute, il faut attendre que celle-ci retombe dans les normes. Ensuite, lorsque le participant est placé dans la TEP, un traceur radio-isotope, le ¹⁸FDG est injecté. Lors des 25 premières minutes, le participant passe l'examen de la TEP, mais aussi l'EEG simultanément (précisons que les résultats de l'examen EEG ne sont pas l'objet de ce mémoire). Finalement, les 35 dernières minutes d'acquisitions TEP se font sans EEG. Il est demandé au participant de : « Gardez les yeux ouverts, restez immobile et laissez vos pensées aller et venir librement. Laissez vos pensées divaguer comme vous le désirez ». Pour terminer, le participant remplit une dernière fois le questionnaire d'expériences intérieures afin d'évaluer ses pensées lors de la première partie de la TEP. Toutes les images ont été évaluées par un physicien médical pour vérifier la qualité des images, y compris l'uniformité et l'orientation défectueuses des images, ou la correction de l'atténuation en raison d'une inadéquation entre les images CT et PET. Un médecin de médecine nucléaire et un médecin du service médical de radiodiagnostic ont vérifié la présence d'éventuelles anomalies cérébrales.

Les séries d'images du cerveau entier ont été extraites à l'aide d'un TEP/CT (Biographe Vision 600, Siemens Medical Solutions, Erlangen, Allemagne) situé au CHU de Liège. L'activité injectée correspond à 100MBq avec + ou - 10% de tolérance, correspondant à 1.9 mSv (milliSievert). La quantité d'activité injectée suit les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (Mattson & International Commission on Radiological Protection, 2015).

Un scanner CT à faible dose a été acquis pour la correction de l'atténuation, suivi d'une TEP de 60 minutes. Toutes les images PET ont été reconstruites en utilisant l'algorithme LOR-OSEM en mode liste itératif avec temps de vol et des corrections pour l'atténuation, le temps mort, les événements aléatoires et la diffusion ont été appliquées. Avec ces paramètres d'acquisition et de reconstruction, les images avaient des voxels isotropes de 0,41 × 0,41 × 1,65 mm³ dans une matrice de 880 × 880 × 159 voxels.

L'échantillon de la présente étude comprend également des participants plus âgés qui n'ont pas été soumis à une journée entière d'examens. En effet, ce projet a pu être construit à l'aide de l'équipe médicale de médecine nucléaire et il a été demandé de sélectionner des participants âgés de plus de 70 ans, qui ont été invités à passer une TEP de 10 minutes uniquement. Ces données serviront à construire une base de données pour le service de médecine nucléaire.

L'organisation des différentes étapes du protocole pour les participants amenés à passer tous les examens, mais aussi pour ceux ne participant qu'à la TEP se trouve dans l'Annexe D.

4. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel Jamovi (The Jamovi Project, 2024). Nous avons décidé de concentrer notre étude sur les quatre concepts sélectionnés (voir ci-dessous) en excluant l'analyse des données EEG. Cette décision repose sur le fait que les analyses IRM et TEP apportent une base de données suffisamment riche et pertinente pour nos objectifs. Afin de maintenir une clarté dans notre démarche, nous avons choisi de ne pas élargir l'analyse aux EEG, ce qui nous permet de garantir une interprétation approfondie des résultats obtenus à partir des autres techniques d'imagerie.

4.1. *Analyses comportementales*

Les données des questionnaires sur les expériences intérieures ont été extraites pour l'orientation des pensées (intérieure vs. extérieure), ainsi que les facteurs d'imagerie mentale visuelle et de discours interne sur base de quatre des items proposés :

- J'étais orienté(e) vers l'intérieur (sur moi-même).
- J'étais orienté(e) vers l'extérieur (l'environnement autour de moi).
- Il y avait des représentations visuelles dans mes pensées.
- J'ai imaginé entendre ma propre voix (discours interne).

Sur la base des analyses statistiques effectuées, il apparaît que les données ne suivent pas une distribution normale. Cette conclusion a été établie après avoir soumis nos variables au test de Shapiro-Wilk. Une moyenne des valeurs obtenues pour les parties IRM et TEP a été calculée afin de mieux comprendre les expériences intérieures des participants. Cette approche a été choisie pour estimer le temps global que les participants ont consacré à ces expériences intérieures au niveau du groupe. Sur la base des moyennes calculées, nous avons procédé à

des tests des rangs signés de Wilcoxon pour analyser les différences significatives dans les temps passés par les participants en discours intérieur par rapport à l'imagerie mentale, ainsi que pour évaluer la prévalence des pensées orientées vers l'intérieur par rapport à celles orientées vers l'extérieur. Des corrélations de Spearman ont été calculées afin d'estimer la relation entre tous les différents facteurs : que ce soit au niveau de l'orientation intérieure ou extérieure des pensées, mais aussi au niveau de leur forme (images ou discours interne). Nous avons également étudié la relation entre l'âge et les réponses obtenues aux questionnaires via des corrélations de Spearman. La méthode de Bonferroni est appliquée pour ajuster les p-valeurs afin de tenir compte du fait que plusieurs tests de corrélation sont effectués simultanément.

4.2. *Analyses de neuro-imagerie*

Analyses IRMf. Les données d'IRMf ont été analysées à l'aide du programme CONN (<https://web.conn-toolbox.org>) (Nieto-Castanon & Whitfield-Gabrieli, 2022) supporté par MATLAB 2023b (<https://matlab.mathworks.com>). Les données fonctionnelles ont été prétraitées selon un pipeline comprenant plusieurs étapes clés (Nieto-Castanon, 2020b). Les images fonctionnelles ont été réalignées à l'aide de SPM Realign et Unwarp (Andersson et al., 2001), où toutes les acquisitions ont été co-enregistrées à une image de référence (première acquisition de la première session) en utilisant une approche des moindres carrés et une transformation à 6 paramètres (corps rigide) (Friston et al., 1995), et rééchantillonnées en utilisant une interpolation b-spline pour corriger les mouvements et les interactions de susceptibilité magnétique. Les images fonctionnelles ont également été corrigées pour les désalignements temporels de l'acquisition des tranches.

Les acquisitions potentiellement aberrantes ont été identifiées à l'aide de ART (*Artifact detection tools*) (Whitfield-Gabrieli et al., 2011) comme ayant un déplacement image par image supérieur à 0,9 mm ou des variations du signal BOLD dépassant 5 écarts-types (Power et al., 2014). Les données fonctionnelles et structurelles ont été normalisées dans l'espace MNI, segmentées en matière grise, matière blanche et liquide céphalorachidien, et rééchantillonnées en voxels isotropiques de 2 mm (Nieto-Castanon, 2022). Enfin, les données fonctionnelles ont été lissées (« *smoothing* ») avec un noyau gaussien de 8 mm FWHM (*full width half maximum*).

Les données fonctionnelles ont été débruitées (« *denoising* ») par ComCor, tel qu'implémenté dans le CONN Toolbox (Nieto-Castanon, 2020a). Cela a inclus la régression des effets de confusion provenant de la matière blanche (5 composants) et du liquide

céphalorachidien (5 composants). Les paramètres de mouvement ainsi que leurs dérivées premières (au total 12 facteurs) ont également été pris en compte et ajustés dans les données pour corriger les effets de mouvement pendant l'acquisition (Friston et al., 1996).

Les séries temporelles BOLD ont ensuite été filtrées en bande entre 0,008 Hz et 0,09 Hz. Les composants de bruit CompCorr ont été estimés en calculant le signal BOLD moyen ainsi que les plus grands composants principaux orthogonaux à la moyenne BOLD et aux paramètres de mouvement. Après le débruitage, les degrés de liberté effectifs du signal BOLD ont été estimés entre 55,5 et 56,6.

Pour les analyses au niveau individuel, des cartes de connectivité basées sur des graines au niveau des voxels ont été estimées pour caractériser les motifs de connectivité fonctionnelle entre 8 régions d'intérêt : le CCP, le CPFM, le CPFLD droit, le CPFLD gauche, le lobe pariétal droit, le lobe pariétal gauche, le CVP droit et le CVP gauche (voir Tableau 1). La force de la connectivité fonctionnelle était représentée par les coefficients de corrélation bivariés transformés de Fisher, dérivés d'un Modèle Linéaire Général (GLM) pondéré (Nieto-Castanon, 2020c). Les acquisitions individuelles étaient pondérées par une fonction en échelons convoluée avec une fonction de réponse hémodynamique canonique de SPM et rectifiée pour compenser les effets de magnétisation transitoire au début de chaque acquisition.

En utilisant chaque graine comme un masque binaire, nous avons ensuite extrait les coefficients de corrélation bivariés représentant les valeurs de connectivité dans les images de premier niveau pour chaque réseau via `fsl_meants`, un outil de FSL (Jenkinson et al., 2012). Ces valeurs de connectivité ont ensuite été utilisées pour étudier les relations entre les réponses aux questionnaires et les valeurs de connectivité IRMf.

Les images au niveau du groupe ont été produites par une analyse de second niveau en utilisant un GLM (Nieto-Castanon, 2020c). Pour chaque voxel, un GLM séparé a été estimé, utilisant les mesures de connectivité du premier niveau comme variables dépendantes et les identifiants des sujets comme variables indépendantes. Les hypothèses au niveau des voxels ont été évaluées avec des statistiques paramétriques multivariées, en tenant compte des effets aléatoires entre les sujets. Les inférences au niveau du cluster étaient basées sur des statistiques paramétriques issues de la théorie du champ aléatoire gaussien (Worsley et al., 1996). Nous avons ensuite créé des masques de connectivité fonctionnelle en utilisant ces estimations moyennes du groupe au niveau de la connectivité pour chacune des graines en seuillant correctement chaque image avant binarisation. Les masques de connectivité IRMf ont ensuite été utilisés pour mesurer les valeurs PET pour chaque réseau.

Tableau 1. Coordonnées des ROIs et références.

Réseau	ROI	Coordonnées	Références
Réseau fronto-pariétal gauche	CPFDL gauche	x=-43 ; y=22 ; z=34	Fair et al., 2009
	Lobe pariétal gauche	x=-43.1 ; y=-47 ; z=45.4	
Réseau fronto-pariétal droit	CPFDL droit	x=43 ; y=22 ; z=34	Rolls et al., 2015
	Lobe pariétal droit	x=46.3 ; y=-47.6 ; z=48.2	
DMN	CPFM	x=-1 ; y=54 ; z=27	Raichle et al., 2001
	CCP	x=0 ; y=-52 ; z=27	
Cortex visuel primaire	CVP droit	x=10 ; y=13 ; z=85	Thomason et al., 2011
	CVP gauche	x=0 ; y=8 ; z=27	

Analyses TEP. Les données TEP ont été analysées à l'aide du programme SPM12 (<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm12/>) supporté par MATLAB 2023b (MathWorks, 2023). Toutes les étapes de pré-traitement (co-enregistrement, normalisation, lissage et mise à l'échelle) sont effectuées automatiquement en suivant un pipeline autonome basé sur un template [18F]FDG-PET spécifique aux troubles de la conscience disponible sur le site internet github (https://github.com/GIGA-Consciousness/COFFEE_BREAK_FDGPET). Ce script permet de définir automatiquement l'origine des images au niveau de la commissure antérieure (Sala, 2022).

Les données de chaque sujet ont été normalisées dans un espace stéréotaxique standard et lissées avec un noyau isotropique de 14 mm de largeur à mi-hauteur. La normalisation globale a été effectuée en appliquant une échelle proportionnelle. L'ensemble des valeurs de voxels résultantes pour chaque contraste, constituant une carte des statistiques t (SPMt), a été transformé en distribution normale unitaire (SPMZ) et le seuil a été fixé à $p < 0,001$.

Dans le cadre exploratoire de ce mémoire, nous avons extrait les valeurs de fixation standardisées (SUV), ainsi que les ratios des valeurs de fixation standardisées (*Standardized Uptake Value Ratio* – $SUV_{r_{global}}$), ajustés en fonction de la moyenne globale du cerveau (voir Tableau 2). Le SUV fournit une mesure absolue du métabolisme du glucose, en corrigeant les

valeurs de radioactivité mesurées lors des scans TEP pour tenir compte des variations dans la quantité de traceur injecté et le poids du patient (Thie, 2004). Le $SUV_{r_{global}}$ fournit une mesure relative du métabolisme du glucose qui est indépendante du métabolisme global du glucose et permet l'examen spécifique de nos ROIs (Schwarz et al., 2017). Les données SUV et $SUV_{r_{global}}$ ont été extraites à l'aide du logiciel REX (Response Exploration for Neuroimaging Datasets) (Duff, 2008). Nous avons également décidé d'utiliser les mêmes ROIs que celles utilisées lors des analyses IRM (que nous appellerons ROI initial), mais aussi les masques que nous avons pu extraire via le logiciel CONN (masques de connectivité fonctionnelle).

Tableau 2. Formules de SUV et $SUV_{r_{global}}$.

	Formule
SUV	$\frac{(Absorption\ dans\ la\ région\ cible) \times (Poids)}{(Dose\ injectée)}$
$SUV_{r_{global}}$	$\frac{(Absorption\ dans\ la\ région\ cible)}{(Absorption\ dans\ la\ région\ de\ référence)}$

4.3. *Analyses des données comportementales en lien avec les données de neuro-imagerie*

Analyses IRMf. Le programme CONN nous a permis d'extraire les données de connectivité fonctionnelle pour chaque ROI au niveau individuel, que nous utilisons pour les analyses avec les données comportementales. Comme mentionné ci-dessus, les résultats des analyses de groupe nous ont aussi permis d'obtenir les masques de connectivité fonctionnelle que nous réutilisons pour les analyses TEP. Les corrélations partielles entre les variables comportementales et la connectivité fonctionnelle des ROIs ont été évaluées au moyen du coefficient de corrélation de Spearman, tout en contrôlant la variable « Âge ». Pour les variables significativement corrélées, nous avons également été plus loin en effectuant des régressions linéaires multiples afin de vérifier nos différentes hypothèses. Pour chacune d'entre elles, nous avons utilisé l'indice de tolérance et le facteur d'inflation de la variance afin de nous permettre de mettre en évidence un potentiel problème de multicollinéarité (situations où les variables explicatives sont fortement corrélées entre elles, l'indice de tolérance et le facteur d'inflation de

la variance nous donnant une indication du degré auquel chaque variable explicative peut être prédite par les autres variables explicatives du modèle) (Pérée, 2021).

Analyses TEP. Les corrélations partielles entre les variables comportementales et le métabolisme cérébral des ROIs ont été évaluées au moyen du coefficient de corrélation de Spearman, tout en contrôlant la variable « Âge ». A nouveau, nous avons également été plus loin pour les variables significativement corrélées en effectuant des régressions linéaires multiples afin de vérifier nos différentes hypothèses. Pour chacune d'entre elles, nous avons utilisé l'indice de tolérance et le facteur d'inflation de la variance afin de nous permettre de mettre en évidence un potentiel problème de multicollinéarité.

Résultats

1. Participants

Au total, 36 participants ont pu prendre part à cette expérience. Les données démographiques des participants, les résultats individuels au questionnaire pour les quatre facteurs évalués (orientation interne des pensées, orientation externe des pensées, discours interne, imagerie mentale visuelle), ainsi que les données de neuro-imagerie disponibles pour chacun d'entre eux se trouvent dans l'Annexe E. La tranche d'âge des participants inclus est donc comprise entre 19 et 78 ans ($M = 49.42$, $SD = 18.76$) avec 14 femmes et 22 hommes. Nous avons pu obtenir des données IRM chez 33 participants dont 12 femmes et 21 hommes, avec une tranche d'âge comprise entre 19 et 75 ans ($M = 47.15$, $SD = 17.91$). Enfin, nous avons pu obtenir des données TEP chez 32 participants dont 11 femmes et 21 hommes, avec une tranche d'âge comprise entre 19 et 78 ans ($M = 50.16$, $SD = 18.67$).

2. Analyses comportementales

En moyenne, durant l'IRM et la TEP, les participants avaient tendance à avoir des pensées orientées vers eux-mêmes ($M = 5.76$, $SD = 2.38$) plutôt que vers l'environnement ($M = 4.78$, $SD = 2.56$) (voir Tableau 3). Ils avaient également tendance à rapporter plus de pensées sous forme de discours interne ($M = 4.9$, $SD = 3.3$) que sous forme d'images ($M = 2.8$, $SD = 3.08$).

Tableau 3. Moyenne et écart type des différentes variables comportementales extraites.

	Orientation intérieure	Orientation extérieure	Imagerie mentale visuelle	Discours interne
Moyenne	5.764	4.778	2.805	4.903
Écart-type	2.386	2.567	3.080	3.303

Les résultats des deux tests des rangs signés de Wilcoxon se trouvent dans le Tableau 4. Les résultats de notre première analyse ($W = 88.5$, $p = 0.003$) indiquent que les participants passent significativement plus de temps en discours intérieur qu'en imagerie mentale visuelle. La taille de l'effet calculée est de -0,619, suggérant une taille d'effet modérée à grande. Les résultats de notre deuxième analyse ($W = 259.0$, $p = 0.206$) indiquent qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les pensées orientées vers l'intérieur et celles

orientées vers l'extérieur. De plus, la taille de l'effet est de 0,276, suggérant une taille d'effet modeste. Ces résultats montrent que les participants ne manifestent pas de préférence marquée pour les pensées orientées vers l'intérieur ou l'extérieur, et l'effet observé est relativement faible.

Tableau 4. Résultats des deux tests de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Test t pour échantillons appariés						
		Statistique		P	Taille de l'effet	
Discours interne	Imagerie mentale visuelle	W de Wilcoxon	88.5	0.003	Corrélation entre rangs bisériés	-0.619
Orientation externe	Orientation interne	W de Wilcoxon	259.0	0.206	Corrélation entre rangs bisériés	0.276

Nous pouvons observer une corrélation négative significative entre l'âge et les pensées orientées vers l'intérieur ($\rho=-0.462$, $p=0.005$) ainsi qu'entre l'âge et le discours interne ($\rho=-0.687$, $p=0.005$) (voir Tableau 5) tandis qu'aucune corrélation significative n'a pu être observée entre l'âge et les pensées orientées vers l'extérieur ($\rho=0.168$, $p=0.327$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.210$, $p=0.219$). Nous pouvons également observer une corrélation négative significative entre le discours interne et les pensées orientées vers l'extérieur ($\rho=-0.456$, $p=0.005$) tandis que les pensées orientées vers l'extérieur ne sont pas corrélées significativement avec les pensées orientées vers l'intérieur ($\rho=-0.265$, $p=0.119$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.221$, $p=0.196$). Nous pouvons ensuite constater qu'aucune corrélation significative n'a été observée entre les pensées orientées vers l'intérieur et le discours interne ($\rho=0.418$, $p=0.011$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.238$, $p=0.162$), ni entre le discours interne et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.315$, $p=0.062$).

Lors de l'IRM plus spécifiquement, nous pouvons observer (voir Tableau 6) une corrélation négative significative entre l'âge et les pensées orientées vers l'intérieur ($\rho=-0.538$, $p=0.001$), mais aussi avec le discours interne ($\rho=-0.676$, $p<0.001$) tandis que les corrélations entre l'âge et les pensées orientées vers l'extérieur ($\rho=0.013$, $p=0.944$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.207$, $p=0.247$) ne se sont pas révélées significatives. Les pensées orientées vers l'extérieur n'ont montré aucune corrélation significative, que ça soit avec les pensées orientées vers l'intérieur ($\rho=0.004$, $p=0.984$), le discours interne ($\rho=-0.388$, $p=0.026$) ou l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.092$, $p=0.612$). Nous pouvons ensuite constater qu'aucune corrélation

significative n'a été observée entre les pensées orientées vers l'intérieur et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.304$, $p=0.086$), tandis que les pensées orientées vers l'intérieur sont corrélées avec le discours interne ($\rho=0.480$, $p=0.005$). Enfin, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une corrélation significative entre le discours interne et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.358$, $p=0.041$).

Tableau 5. Corrélations entre les moyennes de différentes variables comportementales.

		Âge	Orientation externe	Orientation interne	Discours interne
Orientation externe	Rho de Spearman ddl Valeur p	0.168 34 0.327			
Orientation interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.462 34 0.005	-0.264 34 0.119		
Discours interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.687 34 <.001	-0.456 34 0.005	0.418 34 0.011	
Imagerie mentale visuelle	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.210 34 0.219	-0.221 34 0.196	0.238 34 0.162	0.315 34 0.062

Lors de la TEP, nous pouvons observer (voir Tableau 7) une corrélation négative significative entre l'âge et le discours interne ($\rho=-0.665$, $p<0.001$) tandis qu'aucune corrélation significative n'a pu être observée entre l'âge et les pensées orientées vers l'extérieur ($\rho=0.260$, $p=0.152$), vers l'intérieur ($\rho=-0.420$, $p=0.017$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.219$, $p=0.228$). Nous pouvons également constater une corrélation négative significative entre les pensées orientées vers l'extérieur et celles orientées vers l'intérieur ($\rho=-0.53$, $p=0.002$) tandis qu'aucune corrélation significative n'a pu être observée entre les pensées orientées vers l'extérieur et le discours interne ($\rho=-0.304$, $p=0.090$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=-0.328$, $p=0.066$). Cependant, des corrélations positives significatives sont observées entre les pensées orientées vers l'intérieur et le discours interne ($\rho=0.508$, $p=0.003$) et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.494$, $p=0.004$). Finalement, aucune corrélation significative n'a pu être observée entre le discours interne et l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.354$, $p=0.047$).

Tableau 6. Corrélations des données comportementales lors de l'IRM.

		Âge	Orientation externe	Orientation interne	Discours interne
Orientation externe	Rho de Spearman ddl Valeur p	0.013 31 0.944			
Orientation interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.538 31 0.001	0.004 31 0.984		
Discours interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.676 31 <.001	-0.388 31 0.026	0.480 31 0.005	
Imagerie mentale visuelle	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.207 31 0.247	-0.092 31 0.612	0.304 31 0.086	0.358 31 0.041

Tableau 7. Corrélation des données comportementales lors de la TEP.

		Âge	Orientation externe	Orientation interne	Discours interne
Orientation externe	Rho de Spearman ddl Valeur p	0.260 30 0.151			
Orientation interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.420 30 0.017	-0.530 30 0.002		
Discours interne	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.665 30 <.001	-0.304 30 0.090	0.508 30 0.003	
Imagerie mentale visuelle	Rho de Spearman ddl Valeur p	-0.219 30 0.228	-0.328 30 0.066	0.494 30 0.004	0.354 30 0.047

Concernant les corrélations entre les différentes variables comportementales lors de l'IRM et lors de la TEP, les seules corrélations positives significatives sont observées pour l'imagerie mentale visuelle ($\rho=0.801$, $p<0.001$) et le discours interne ($\rho=0.811$, $p<0.001$) (voir Tableau 8). Les corrélations sont non significatives pour l'orientation intérieure ($\rho=0.485$,

$p=0.008$) et extérieure des pensées ($p=0.299$, $p=0.115$). Les nuages de points des résultats entre les 4 variables comportementales se trouvent dans la Figure 6.

Tableau 8. Corrélations entre les différentes variables comportementales lors de l'IRM et lors de la TEP.

	TEP Orientation intérieure	TEP Orientation extérieure	TEP Imagerie mentale visuelle	TEP Discours interne
IRM Orientation intérieure	$\rho=0.485$ ddl=27 $p=0.008$			
IRM Orientation extérieure		$\rho=0.299$ ddl=27 $p=0.115$		
IRM Imagerie mentale visuelle			$\rho=0.801$ ddl=27 $p<0.001$	
IRM Discours interne				$\rho=0.811$ ddl=27 $p<0.001$

3. Analyses de neuro-imagerie

3.1. *IRMf*

Les statistiques paramétriques pour chaque cluster de voxels se trouvent dans l'Annexe F. Les masques de connectivité fonctionnelle des 4 réseaux sont représentés dans la Figure 7. Le masque du réseau fronto-pariétal gauche comprend le CPFDL gauche et le lobe pariétal gauche (Figure 7A). Le masque du réseau fronto-pariétal droit comprend le CPFDL droit et le lobe pariétal droit (Figure 7B). Le masque du cortex visuel primaire comprend le CVP gauche et le CVP droit (Figure 7C). Le masque du DMN comprend le CPFM et le CCP (Figure 7D).

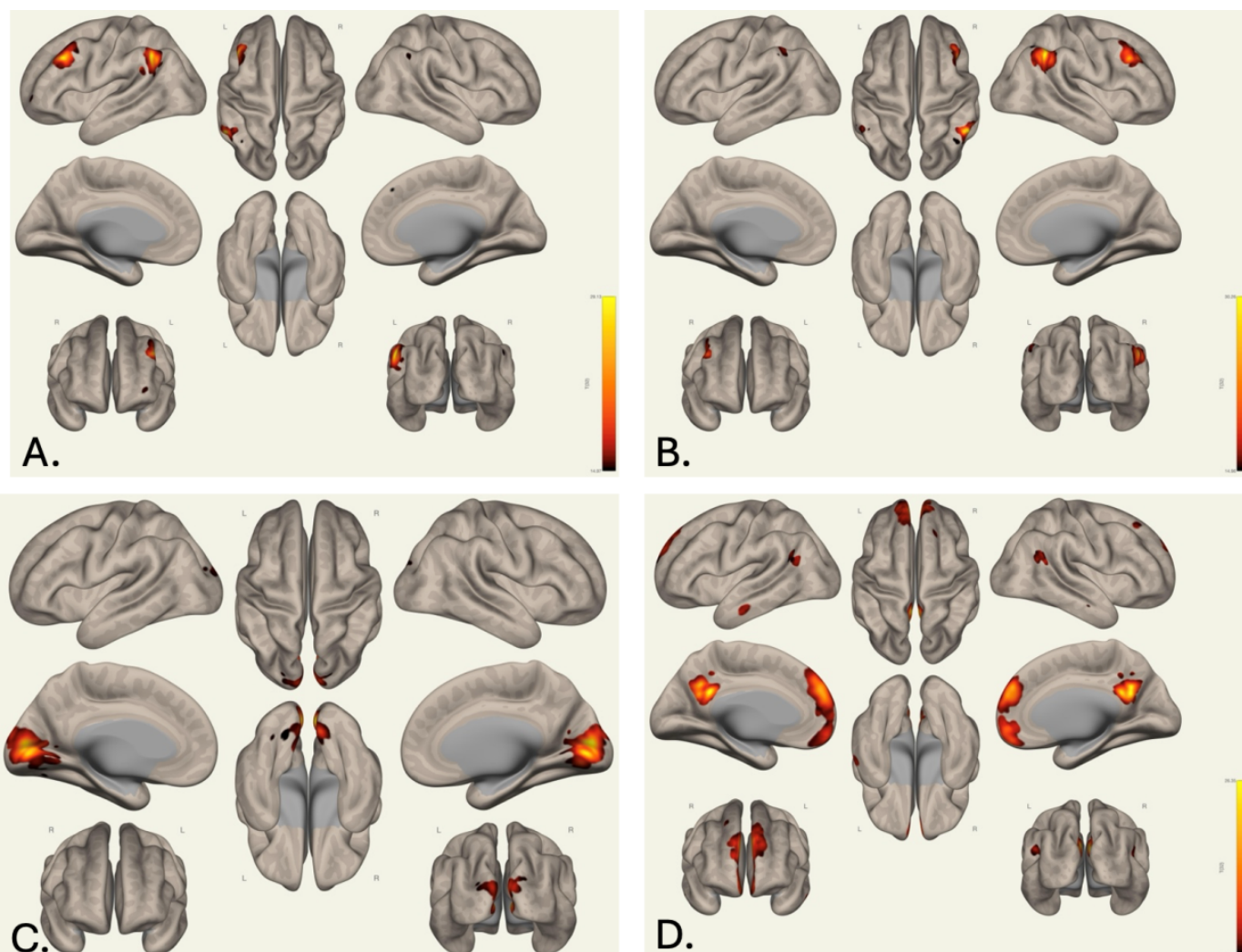


Figure 7. Masques de connectivité fonctionnelle extraits suite aux analyses de groupe. A = réseau fronto-pariétal gauche. B = réseau fronto-pariétal droit. C = cortex visuel primaire. D = DMN.

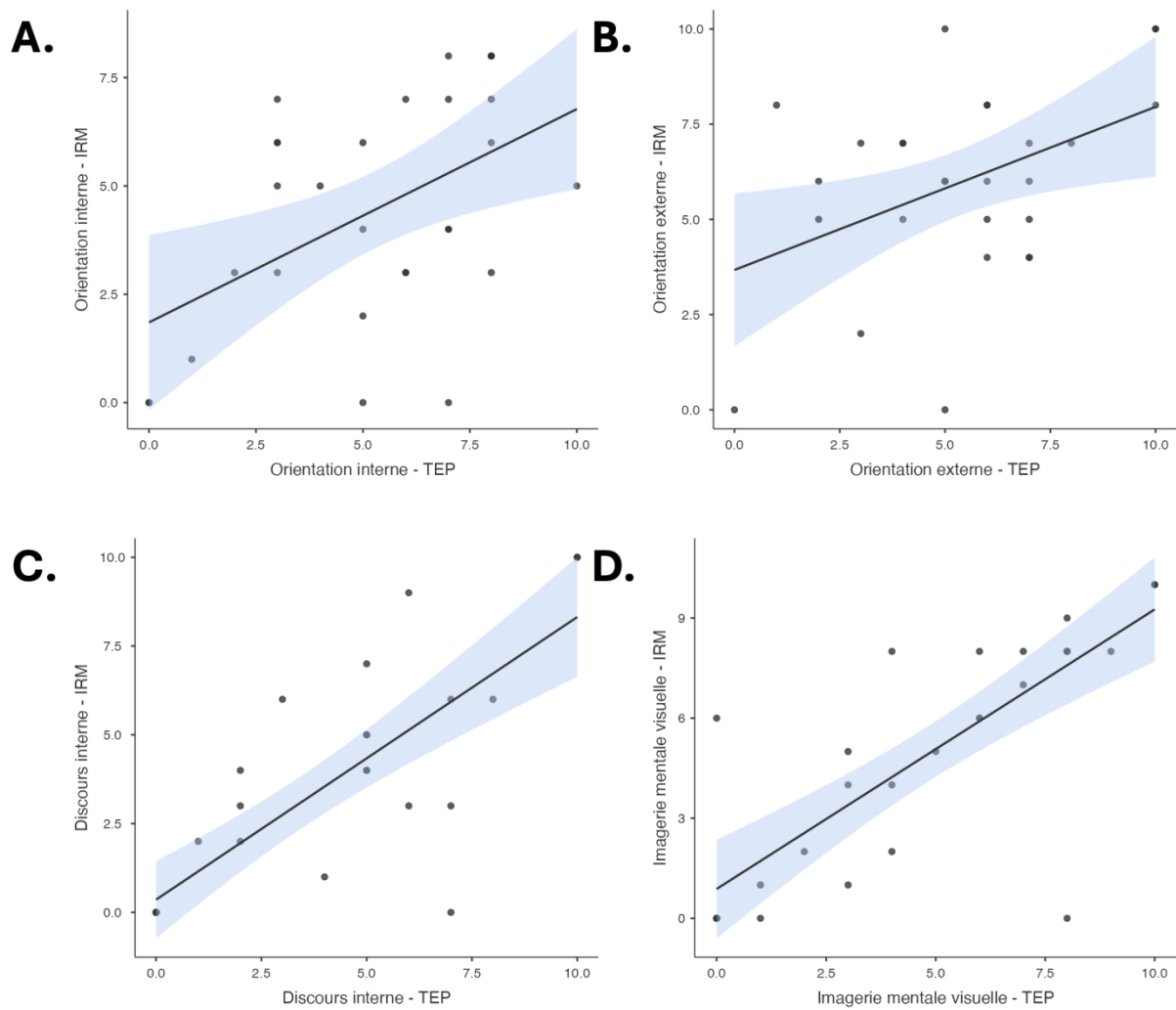


Figure 6. Représentations des nuages de points des corrélations entre les 4 variables comportementales. A=corrélacion entre les scores d'orientation interne des pensées lors de l'IRM et lors de la TEP. B=corrélacion entre les scores d'orientation externe des pensées lors de l'IRM et lors de la TEP. C=corrélacion entre les scores de discours interne lors de l'IRM et lors de la TEP. D=corrélacion entre les scores d'imagerie mentale visuelle lors de l'IRM et lors de la TEP.

3.1.TEP

Les résultats des valeurs de SUV et $SUV_{r_{global}}$ sont présentés dans l'Annexe G. Ce tableau regroupe les valeurs extraites sur base de chaque masque de connectivité fonctionnelle, tel que présentés dans la Figure 7.

4. Analyses des données comportementales en lien avec la neuro-imagerie

4.1. Discours interne

IRMf. Les résultats des corrélations partielles ne nous permettent pas de mettre en évidence de relations significatives entre le discours interne et la connectivité fonctionnelle de nos différentes ROIs. Toutes les corrélations se trouvaient sous le seuil de significativité, allant de $\rho=0.197$, $p=0.234$ pour le lobe pariétal inférieur gauche, à $\rho=-0.025$, $p=0.892$ pour le CPFDL droit.

TEP. Les résultats des corrélations partielles nous permettent de mettre en évidence une relation significative entre le discours interne et le $SUVr_{\text{global}}$ du CPFDL gauche, qu'il soit évalué à l'aide du masque de connectivité fonctionnelle ($\rho=0.422$, $p=0.018$) ou de la ROI d'origine ($\rho=0.406$, $p=0.023$).

Les résultats de la première régression linéaire multiple (voir Tableau 9) nous permettent de rejeter l'hypothèse de la nullité du coefficient de détermination dans notre échantillon ($F=8.13$, $p=0.002$). Autrement dit, on rejette l'hypothèse que, prises dans leur ensemble, les deux variables « discours interne » et « âge » n'expliqueraient aucunement la variation du $SUVr_{\text{global}}$ du CPFDL gauche (évalué via le masque de connectivité fonctionnelle) (voir Figure 8A). On peut donc conclure que ce modèle est pertinent. Plus spécifiquement, la probabilité de dépassement pour la variable « âge » étant de 0.376, nous pouvons tolérer l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon. La probabilité de dépassement pour la variable « Discours interne » étant de 0.03, nous pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon.

Les résultats de la deuxième régression linéaire multiple (voir Tableau 9) nous permettent de rejeter l'hypothèse de la nullité du coefficient de détermination dans notre échantillon ($F=6.61$, $p=0.004$). Autrement dit, on rejette l'hypothèse que, prises dans leur ensemble, les deux variables « discours interne » et « âge » n'expliqueraient aucunement la variation du $SUVr_{\text{global}}$ du CPFDL gauche (évalué via la ROI d'origine) (voir Figure 8B). On peut donc conclure que ce modèle est pertinent. Plus spécifiquement, la probabilité de dépassement pour la variable « âge » étant de 0.282, nous pouvons tolérer l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon. La probabilité de dépassement pour la variable « Discours interne » étant de 0.08, nous pouvons tolérer l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon.

Tableau 9. Résultats des différentes régressions linéaires. *=métabolisme évalué à l'aide d'un masque de connectivité fonctionnelle.

Régression linéaire sur la relation entre le $SUVr_{global}$ du CPFDL gauche* et le discours interne et l'âge					
Mesures de l'ajustement du modèle					
R	R ²	F	ddl1	ddl2	p
0.599	0.359	8.13	2	29	0.002
Coefficients du modèle – CPFDL gauche*					
Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p	
Ordonnée à l'origine	1.882	0.074	25.437	<.001	
Âge	-0.001	0.001	-0.899	0.378	
Discours interne	0.015	0.006	2.288	0.030	
Régression linéaire sur la relation entre le $SUVr_{global}$ du CPFDL gauche et le discours interne et l'âge					
Mesures de l'ajustement du modèle					
R	R ²	F	ddl1	ddl2	p
0.560	0.313	6.61	2	29	0.004
Coefficients du modèle – CPFDL gauche					
Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p	
Ordonnée à l'origine	1.939	0.074	26.09	<.001	
Âge	-0.001	0.001	-1.10	0.282	
Discours interne	0.012	0.006	1.81	0.080	
Régression linéaire sur la relation entre le $SUVr_{global}$ du DMN* et les pensées orientées vers l'extérieur et l'âge					
Mesures de l'ajustement du modèle					
R	R ²	F	ddl1	ddl2	p
0.715	0.511	15.1	2	29	<.001
Coefficients du modèle – DMN*					
Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p	
Ordonnée à l'origine	1.811	0.046	39.62	<.001	
Âge	0.004	8.20 ^e -4	5.30	<.001	
Orientation externe	-0.017	0.006	-2.99	0.006	
Régression linéaire sur la relation entre le $SUVr_{global}$ du CVP* et les pensées orientées vers l'extérieur et l'âge					
Mesures de l'ajustement du modèle					
R	R ²	F	ddl1	ddl2	p
0.715	0.511	15.1	2	29	<.001
Coefficients du modèle – CVP*					

Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p
Ordonnée à l'origine	1.811	0.046	39.62	<.001
Âge	0.004	8.20 ^e -4	5.30	<.001
Orientation externe	-0.017	0.006	-2.99	0.006

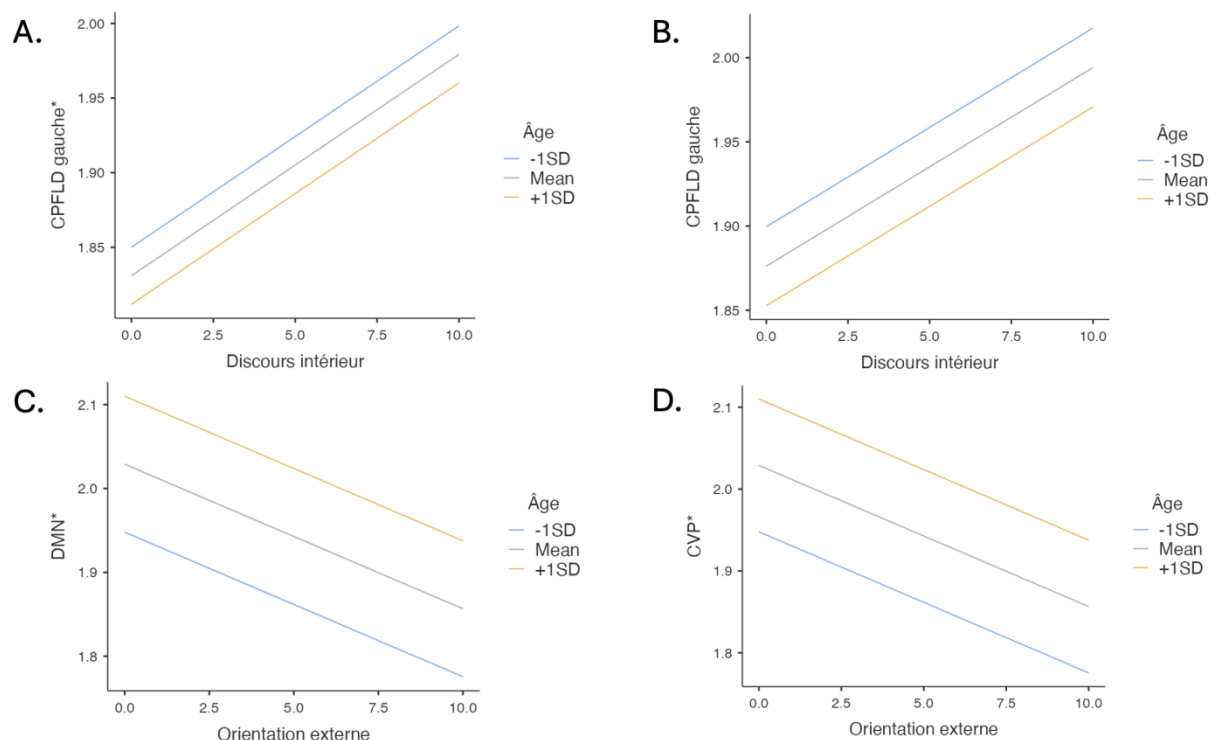


Figure 8. Estimation des moyennes du $SUVr_{global}$ en fonction des expériences intérieures. A=estimation des moyennes du métabolisme du CPFLD gauche en fonction du discours interne et de l'âge. B=estimation des moyennes du métabolisme du CPFLD gauche en fonction du discours interne et de l'âge. C=estimation des moyennes du métabolisme du DMN en fonction de l'orientation extérieure et de l'âge. D=estimation des moyennes du métabolisme du CVP en fonction de l'orientation extérieure et de l'âge. *=métabolisme évalué à l'aide d'un masque de connectivité fonctionnelle.

4.2. Imagerie mentale visuelle

IRMf. Les résultats des corrélations partielles ne nous permettent pas de mettre en évidence de relations significatives entre l'imagerie mentale visuelle et la connectivité fonctionnelle de nos différentes ROIs. Toutes les corrélations se trouvaient sous le seuil de significativité, allant de $\rho=-0.291$, $p=0.106$ pour le CVP droit, à $\rho=-0.006$, $p=0.975$ pour le DMN.

TEP. Les résultats des corrélations partielles ne nous permettent pas de mettre en évidence de relations significatives entre l'imagerie mentale visuelle et le métabolisme global de nos différentes ROIs. Toutes les corrélations se trouvaient sous le seuil de significativité,

allant de $\rho=-0.332$, $p=0.068$ pour le lobe pariétal inférieur droit (masque de connectivité fonctionnelle), à $\rho=0.07$, $p=0.708$ pour le CPFDL gauche (évalué via le ROI d'origine).

4.3. *Orientation intérieure*

IRMf. Les résultats des corrélations partielles ne nous permettent pas de mettre en évidence de relations significatives entre l'orientation intérieure des pensées et la connectivité fonctionnelle de nos différentes ROIs. Toutes les corrélations se trouvaient sous le seuil de significativité, allant de $\rho=-0.304$, $p=0.116$ pour le lobe pariétal inférieur droit, à $\rho=0.045$, $p=0.819$ pour le CVP droit.

TEP. Les résultats des corrélations partielles ne nous permettent pas de mettre en évidence de relations significatives entre l'orientation intérieure des pensées et le métabolisme global de nos différentes ROIs. Toutes les corrélations se trouvaient sous le seuil de significativité, allant de $\rho=0.351$, $p=0.053$ pour le CPFDL gauche (masque de connectivité fonctionnelle), à $\rho=0.016$, $p=0.931$ pour le CVP droit (masque de connectivité fonctionnelle).

4.4. *Orientation extérieure*

IRMf. Les résultats des corrélations partielles nous permettent de mettre en évidence une relation significative entre l'orientation extérieure des pensées et la connectivité fonctionnelle du réseau fronto-pariétal droit ($\rho=0.014$, $p=-0.430$). Les résultats de la régression linéaire multiple (voir Tableau 10) nous permettent de rejeter l'hypothèse de la nullité du coefficient de détermination dans notre échantillon ($F=5.41$, $p=0.01$). Autrement dit, on rejette l'hypothèse que, prises dans leur ensemble, les deux variables « orientation extérieure » et « âge » n'expliqueraient aucunement la variation de la connectivité du réseau fronto-pariétal droit (composé du cortex préfrontal dorsolatéral droit et du lobe pariétal droit) (voir Figure 9). On peut donc conclure que ce modèle est pertinent. Plus spécifiquement, la probabilité de dépassement pour la variable « âge » étant de 0.066, nous pouvons tolérer l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon. La probabilité de dépassement pour la variable « Orientation extérieure » étant de 0.011, nous pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon.

TEP. Les résultats des corrélations partielles nous permettent de mettre en évidence une relation négative significative entre l'orientation extérieure des pensées et le métabolisme du DMN (évalué via le masque de connectivité fonctionnelle) ($\rho=-0.439$, $p=0.014$), mais aussi

avec le métabolisme du CVP (évalué via le masque de connectivité fonctionnelle) ($p=-0.439$, $p=0.014$).

Tableau 10. Régression linéaire multiple de la connectivité du réseau fronto-pariétal droit avec les pensées orientées vers l'extérieur et l'âge.

Régression linéaire sur la relation entre la connectivité du réseau fronto-pariétal droit et les pensées orientées vers l'extérieur et l'âge					
Mesures de l'ajustement du modèle					
R	R ²	F	ddl1	ddl2	p
0.515	0.265	5.41	2	30	0.010
Coefficients du modèle – Réseau fronto-pariétal droit					
Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p	
Ordonnée à l'origine	1.119	0.052	21.48	<.001	
Âge	-0.001	7.83 ^e -4	-1.91	0.066	
Orientation externe	-0.015	0.005	-2.72	0.011	

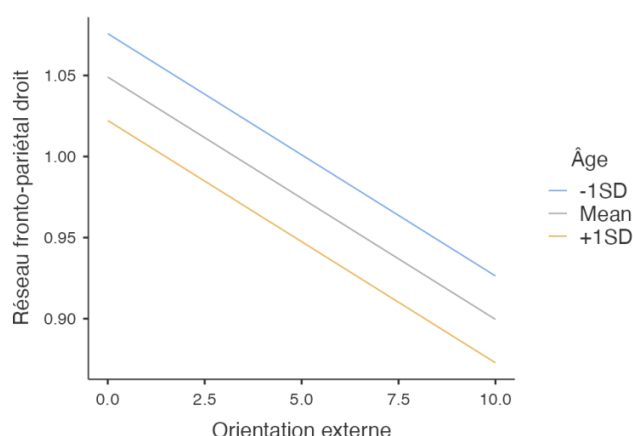


Figure 9. Estimation des moyennes de connectivité fonctionnelle du réseau fronto-pariétal droit en fonction de l'orientation extérieure et de l'âge.

Les résultats de la première régression linéaire multiple (voir Tableau 9) nous permettent de rejeter l'hypothèse de la nullité du coefficient de détermination dans notre échantillon ($F=15.1$, $p<0.001$). Autrement dit, on rejette l'hypothèse que, prises dans leur ensemble, les deux variables « Orientation extérieure » et « âge » n'expliqueraient aucunement la variation du métabolisme du DMN (évalué via le masque de connectivité fonctionnelle) (voir Figure 8C). On peut donc conclure que ce modèle est pertinent. Plus spécifiquement, la probabilité de dépassement pour la variable « âge » étant inférieure à 0.001, nous pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon. La probabilité de dépassement pour la variable « Orientation extérieure » étant de 0.006, nous

pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon.

Les résultats de la deuxième régression linéaire multiple (voir Tableau 9) nous permettent de rejeter l'hypothèse de la nullité du coefficient de détermination dans notre échantillon ($F=15.1$, $p<0.001$). Autrement dit, on rejette l'hypothèse que, prises dans leur ensemble, les deux variables « Orientation extérieure » et « âge » n'expliqueraient aucunement la variation du métabolisme du CVP (évalué via le masque de connectivité fonctionnelle) (voir Figure 8D). On peut donc conclure que ce modèle est pertinent. Plus spécifiquement, la probabilité de dépassement pour la variable « âge » étant inférieure à 0.001, nous pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon. La probabilité de dépassement pour la variable « Orientation extérieure » étant de 0.006, nous pouvons rejeter l'hypothèse que le coefficient de cette variable pourrait être nul dans notre échantillon.

Discussion

Ce mémoire avait pour objectif principal d'explorer les réseaux cérébraux sous-tendant nos expériences intérieures en évaluant la forme de celles-ci, c'est-à-dire discours interne ou imagerie mentale visuelle, mais aussi leur orientation intérieure ou extérieure. Au préalable, nous souhaitions évaluer les profils d'expériences intérieures des participants en prenant l'âge en considération. Plus précisément, nous avons tenté de déterminer si les facteurs de forme et d'orientation étaient mutuellement exclusifs. Par exemple, est-ce que les participants ont plutôt tendance à présenter du discours interne, de l'imagerie mentale visuelle ou les deux ?

Les acquisitions de la présente étude étant toujours en cours, nous avons jugé pertinent de calculer notre puissance statistique afin d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus jusqu'à présent. La puissance statistique a été calculée à l'aide du logiciel G*Power (Faul et al., 2009), obtenant une valeur de 0.96. Cette analyse a été effectuée avec un effect size f de 0.56, un niveau de signification α de 0.05, une taille d'échantillon de 32 participants et 2 prédicteurs. Nous avons pris l'exemple d'une de nos régressions pour calculer cette puissance : la régression linéaire sur la relation entre le SUVr global du CPFDL gauche, le discours interne et l'âge.

1. Profils d'expériences intérieures

Tout d'abord, nos résultats ne nous ont pas permis de mettre en évidence des profils d'expériences intérieures dominants concernant la forme. En effet, la corrélation non significative entre le discours interne et l'imagerie mentale visuelle laisse à penser que les participants utilisent généralement les deux types d'expériences. Delamillieure et al. (2009) avaient toutefois pu mettre en évidence un profil dominant d'expériences intérieures chez la plupart de leurs participants puisque 66% d'entre eux utilisaient principalement l'imagerie mentale visuelle, alors que les autres combinaient différents types d'expériences incluant l'imagerie mentale visuelle, mais aussi le discours interne, la conscience somatosensorielle, l'expérience musicale intérieure et le traitement mental des nombres. En revanche, nos résultats apportent une nuance à l'étude de Stawarczyk et al. (2013) sur le vagabondage de l'esprit. Bien que leurs conclusions n'aient révélé aucune différence significative entre le discours interne et l'imagerie mentale visuelle, nos analyses de groupe indiquent une tendance générale des participants à passer plus de temps en discours interne qu'en imagerie mentale visuelle. De plus, 27% de notre échantillon semble ne pas avoir présenté de discours interne, cette différence suggère une variabilité individuelle qui mérite d'être prise en compte.

Ensuite, l'absence de corrélation négative significative entre nos facteurs d'orientation indique ici la même tendance concernant l'orientation intérieure ou extérieure des pensées. Nos participants auraient donc des pensées combinant orientation intérieure et extérieure. Au contraire, l'étude de Vanhaudenhuyse et al. (2010) avait plutôt mis en évidence une corrélation négative entre les pensées orientées vers l'intérieur et les pensées orientées vers l'extérieur. Au niveau individuel, ils avaient mis en lumière une corrélation négative chez 24 de leurs participants tandis qu'un seul d'entre eux présentait une corrélation positive et que 6 d'entre eux ne présentaient aucune corrélation significative entre l'orientation intérieure et extérieure de leurs pensées.

De manière générale, nos résultats n'ont pas pu confirmer les données issues de la littérature, ce qui peut être sous-tendu par plusieurs différences méthodologiques, avec un échantillon bien plus important d'un côté (Delamillieure et al., 2009) et un rapport plus direct des expériences intérieures de l'autre côté, puisque les auteurs se sont basés sur la méthode DES (Vanhaudenhuyse et al., 2010). En effet, cette méthode permet d'interroger les participants à tout moment de façon aléatoire et ainsi obtenir une évaluation plus fidèle des expériences intérieures (Hurlburt et al., 2022; Hurlburt & Akhter, 2006). Certaines études ont pu mettre en évidence le fait que les participants ont tendance à surestimer le temps consacré au discours interne lorsqu'il est évalué via des questionnaires rétrospectifs (estimation de 70.7%) (Heavey et al., 2019), en comparaison avec la méthode DES qui estime plutôt le temps consacré au discours interne à 26% (Heavey & Hurlburt, 2008). Notons que les questionnaires rétrospectifs d'expériences intérieures sont reconnus comme étant fiables, mais présentant une validité concourante modérée, saisissant plutôt une conception très générale des expériences intérieures (Racy & Morin, 2024).

Nos résultats mettent également en évidence une diminution du discours interne et des pensées orientées vers soi-même chez les participants plus âgés. D'autres auteurs ont pu observer un phénomène similaire chez les participants plus âgés dans le cadre du vagabondage mental, montrant notamment une diminution de sa fréquence et de son intensité (Giambra, 2000; Jordão et al., 2019). Les paradigmes expérimentaux exerceraient cependant une influence dans ces résultats : encore une fois, les auteurs ont mis en évidence des résultats différents avec les questionnaires auto-rapportés, en comparaison avec la méthode DES.

Finalement, le fait que le discours interne soit corrélé négativement avec les pensées orientées vers l'extérieur suggère que, lorsque nous nous engageons dans du discours interne, celui-ci n'est le plus souvent pas dirigé vers notre environnement. Bien que le discours interne

puisse aussi être utile pour pouvoir réfléchir sur certains aspects de l'environnement ou sur les autres, par exemple dans le contexte d'une tâche cognitive (Fernyhough & Borghi, 2023), plusieurs de ces fonctions nous concernent directement et nous poussent à avoir des pensées orientées vers nous-mêmes, tels que l'auto-régulation de nos émotions, de nos comportements, notre cognition, planification (dans le cadre de la mémoire à court terme verbale), créativité, etc. (Morin, 2011; Racy & Morin, 2024 ; pour une revue, voir Skipper, 2022).

2. Réseaux neuronaux des expériences intérieures

Nos résultats ont pu mettre en évidence un métabolisme du CPFDL gauche qui augmentait avec le discours interne. Ces résultats sont en accord avec nos hypothèses démontrant une implication des réseaux langagiers lorsque nous sommes engagés dans du discours interne. D'autres études avaient également pu mettre en évidence une association du gyrus frontal inférieur gauche avec le discours interne (McGuire et al., 1995). Certains auteurs ont postulé que les régions frontales seraient les régions responsables de la génération du discours interne (Shergill et al., 2002). Le CPFDL gauche serait également responsable de la régulation de la réactivité du gyrus temporal supérieur et jouerait un rôle clé dans l'attribution des ressources attentionnelles nécessaires à la génération de mots (Friston et al., 1991). L'activité du CPFDL est aussi associée à la mémoire de travail, correspondant à la conservation et la manipulation d'informations temporaires (Engle et al., 1999). Le discours interne permettrait de structurer ces informations et de les utiliser de manière efficace pour résoudre des problèmes ou prendre des décisions. Cette région est également impliquée dans la régulation des émotions et la motivation (Shigemune et al., 2017) : son activation pourrait dès lors être le reflet de la fonction d'encouragement et de motivation du discours interne. De même, le CPFDL participe à la régulation du stress (Wang et al., 2023) et le fait de se parler à soi-même peut être une stratégie de régulation émotionnelle aidant à gérer le stress ou les émotions négatives en réévaluant les situations ou en se rassurant. Le discours interne peut enfin inclure des réflexions sur ses propres pensées, sentiments et comportements ainsi que sur ceux des autres, engageant des processus de théorie de l'esprit (Alderson-Day et al., 2020). Ces réflexions sont connues pour également induire une activation au sein de divers réseaux cérébraux incluant le CPFDL (Nejati et al., 2024).

Les résultats observés lors de l'IRMf nous permettent de conclure que la connectivité fonctionnelle du réseau fronto-pariétal droit a tendance à diminuer lorsque les participants sont engagés dans des pensées orientées vers l'extérieur. Nous n'avons donc pas pu observer les

mêmes résultats que ceux de Vanhaudenhuyse et al. (2010) : une connectivité fonctionnelle du réseau fronto-pariétal droit accrue lorsque les participants sont orientés vers l'extérieur et une augmentation de la connectivité fonctionnelle du DMN lorsque les participants sont orientés vers l'intérieur (ici, DPFM et CCP). À nouveau, ces différences de résultats peuvent être expliquées par une différence de paradigme. Dans leur étude, Vanhaudenhuyse et al. (2010) avaient donné à leurs participants l'instruction de garder les yeux fermés et il leur était demandé lors de l'IRM, approximativement toutes les 20 secondes (de 3 à 30 secondes), de noter leur type de conscience en appuyant sur un bouton (allant de « fortement extérieure » à « fortement intérieure ») pour la période précédant le bip. De plus, l'expérience était terminée lorsque les participants avaient montré 15 réponses pour chaque type de conscience. Leur paradigme expérimental leur a permis d'avoir des mesures précises concernant l'orientation de leur attention, tout en y ajoutant une intensité. En revanche, notre paradigme était basé sur des questionnaires rétrospectifs nous permettant uniquement d'estimer la proportion du temps passé par les participants dans chaque catégorie d'expériences intérieures. Ensuite, cette diminution de la connectivité du réseau fronto-pariétal droit, lorsque les participants s'engagent dans des pensées orientées vers l'extérieur, pourrait s'expliquer par le fait que ce réseau semble être impliqué dans la conscience du « soi physique » (Takeuchi et al., 2019). La conscience du soi physique, dans le modèle biopsychosocial, reflète la perception intégrée de l'individu de son propre corps et de ses sensations incluant le sens de la position, le mouvement, et les aspects émotionnels et cognitifs liés à l'activité physique et à la mémoire corporelle (Unal et al., 2021). Deux études ont montré une implication prédominante du réseau fronto-pariétal droit lorsque les personnes vivent l'illusion de changements posturaux de leurs membres, reflétant ainsi l'expérience consciente du soi physique (Amemiya & Naito, 2016; Cignetti et al., 2014). Ainsi, la désactivation observée de ce réseau pendant l'IRM, en lien avec des pensées orientées vers l'extérieur, pourrait refléter un changement d'attention où l'esprit se détourne de la conscience corporelle pour se concentrer davantage sur l'environnement extérieur.

Nous avons également pu observer une diminution du métabolisme du DMN, ainsi que du CVP lorsque les participants s'engagent dans des pensées orientées vers l'extérieur. Une première explication de ces résultats pourrait être le fait que, quand les participants orientent leurs pensées vers l'extérieur, ils activeraient des réseaux neuronaux qui sont impliqués dans la perception et l'intégration des informations sensorielles externes, ce qui entraînerait une désactivation du DMN qui est plus actif pendant les états de repos et les pensées introspectives (Piani et al., 2024). De plus, nous pouvons également émettre l'hypothèse que, si les pensées

sont dirigées vers l'extérieur, les processus mentaux tels que la rêverie, le vagabondage mental et la réflexion sur soi diminuent, ce qui engendrerait une diminution du métabolisme du DMN (Christoff et al., 2009). Ces résultats sont également cohérents avec ceux de Vanhaudenhuyse et al. (2010), qui ont démontré une anticorrélation entre le réseau lié à la conscience de soi et celui lié à la conscience de l'environnement. L'orientation vers l'extérieur peut également impliquer un changement dans la régulation émotionnelle, réduisant l'activation du DMN associé aux processus émotionnels internes et à la réflexion sur soi (Wu et al., 2024). Enfin, le cerveau fonctionne sur un mode de compétition entre réseaux neuronaux (Raichle et al., 2001). L'activation des réseaux attentionnels et sensoriels externes pourrait induire une diminution de l'activité du DMN et du CVP, réduisant ainsi leur activation.

Nos résultats ne nous ont pas permis d'observer de corrélations significatives entre nos différentes ROIs et les scores d'imagerie mentale visuelle ou de pensées orientées vers l'intérieur, qu'elles soient calculées sur base des mesures de connectivité fonctionnelle ou des $SUVr_{global}$. Cela pourrait être également expliqué par le fait que les différentes expériences intérieures développées dans le cadre de ce mémoire reposeraient sur des processus bien plus complexes que la connectivité ou le métabolisme cérébral global de nos ROIs. Le fait que nous n'ayons pas pu observer d'influence de l'imagerie mentale visuelle sur le métabolisme du CVP va à l'encontre de l'hypothèse suggérant que la perception et l'imagerie mentale visuelle activent de façon similaire le CVP (Pearson, 2019). Une nouvelle conception présentée par Spagna et son équipe postule que ce sont plutôt les régions préfrontales qui seraient à l'origine du processus de recrutement des informations stockées en mémoire visuelle nécessaires à l'imagerie mentale visuelle (Spagna et al., 2021).

Nos résultats montrent également une influence de l'âge sur le métabolisme du DMN et du CVP. Plus précisément, le métabolisme de ces réseaux semble augmenter chez les participants plus âgés. Ces résultats corroborent une étude précédente montrant que les personnes plus âgées ont tendance à avoir une activité du DMN prolongée (difficultés à se désengager dans des activités non liées à la tâche) (Grady et al., 2006). L'augmentation du métabolisme du CVP pourrait quant à lui être le résultat d'une combinaison de facteurs neurobiologiques, cognitifs, comportementaux et environnementaux. La compréhension de ces mécanismes nécessite une approche multifactorielle qui prend en compte les interactions entre le vieillissement, la cognition et la physiologie cérébrale. Une hypothèse pour expliquer l'augmentation du CVP chez les participants plus âgés pourrait être liée à un mécanisme de compensation. En effet, la perte auditive est l'un des troubles les plus fréquents dans cette

population (Dalton et al., 2003). Une étude récente a d'ailleurs montré que les centres corticaux visuels chez les personnes âgées souffrant de perte auditive présentent une activité fonctionnelle accrue par rapport à ceux qui n'en sont pas affectés (Ponticorvo et al., 2022). Nous pourrions donc postuler que les participants les plus âgés ayant participé à cette étude pourraient potentiellement présenter une perte auditive, ce qui induirait une réorganisation du métabolisme du CVP.

Comment expliquer les différences de résultats entre l'IRM et la TEP ? D'un côté, les techniques de TEP au ^{18}F FDG mesurent le métabolisme cérébral au repos, ce dernier étant particulièrement corrélé avec le niveau de conscience de patients en éveil de coma (Stender et al., 2016). De l'autre côté, des fluctuations de basse fréquence dans le signal BOLD de l'IRMf relient les activités de divers réseaux cérébraux au repos. On peut mesurer cela en calculant la relation entre les différentes régions du cerveau, ce qui est appelé connectivité fonctionnelle (Nieto-Castanon & Whitfield-Gabrieli, 2022). Une étude de grande envergure incluant 126 patients en éveil de coma a démontré une sensibilité supérieure de la TEP aux troubles de la conscience ainsi qu'une meilleure validité prédictive (Stender et al., 2014). En effet, tandis que l'évaluation clinique par l'IRMf a montré une sensibilité de 45% (pour la détection des patients ECM) et une valeur prédictive de 56% (prédiction des résultats 12 mois post-évaluation), la TEP-FDG a montré une sensibilité de 93% et une validité prédictive de 74%. De plus, la TEP s'est montrée fidèle et précise, peu importe l'origine de la lésion, mais aussi pour les états chroniques et aigus.

L'étude des réseaux neuronaux de la conscience est particulièrement importante dans le cadre des troubles de la conscience. L'étude de Demertzi et al. (2015) a cherché à mieux comprendre l'activité de différents réseaux au repos en lien avec les ECAs : les réseaux du DMN, fronto-pariétal, de saillance, auditif, sensorimoteur et visuel. Leurs résultats indiquent que l'activité de chacun de ces réseaux présente une capacité discriminante supérieure à 80% pour différencier les patients ECM et ENR.

Les patients en ECA ne possèdent pas la capacité de communiquer, ce qui les empêche de partager leurs expériences intérieures. Cela rend d'autant plus pertinent l'approfondissement de l'étude des divers réseaux cérébraux au repos qui sont en lien direct avec ces expériences intérieures et le niveau de conscience. Cette investigation s'avère cruciale, non seulement pour mieux comprendre ces phénomènes chez les patients, mais aussi pour améliorer notre connaissance de la conscience chez des individus en bonne santé.

3. Limites

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire sont à interpréter avec prudence. En effet, plusieurs limites sont à mentionner. Le fait que ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'acquisition d'une base de données contrôles nous a imposé plusieurs limites méthodologiques. Tout d'abord, il nous était impossible d'utiliser la méthode DES qui se révèle pourtant bien plus adaptée à l'évaluation des expériences intérieures. Ensuite, cette expérience a conduit les participants à passer un grand nombre de tests, ce qui a pu induire une certaine fatigue mentale, mais aussi une baisse de motivation. En effet, la passation des différents tests pouvait parfois durer plus d'une heure. Le fait que la TEP se déroule en fin de journée et dure une heure a également pu induire une grande fatigue chez la plupart des participants. Les résultats peuvent donc avoir été influencés par ce facteur et il aurait été intéressant de varier l'ordre des examens (IRM et TEP). Enfin, les divers critères d'exclusion peuvent induire un biais dans nos résultats. Les précautions métaux, mais aussi les critères de poids, la claustrophobie, etc. nous ont poussés à exclure un certain nombre de participants et nous ont potentiellement empêchés d'avoir une certaine diversité dans nos résultats. Par exemple, certains critères d'inclusion tels que celui concernant les cheveux (qui était appliqué pour l'EEG) auraient pu être ici évités pour permettre une plus grande diversité dans la sélection des participants.

4. Perspectives

Pour améliorer cette étude, il serait pertinent de reproduire ce type d'étude multimodale en utilisant la méthode DES afin d'obtenir des mesures plus précises et détaillées des expériences intérieures des participants. De plus, il aurait été bénéfique d'ajouter davantage de définitions et d'exemples des concepts étudiés afin de garantir que les participants comprennent pleinement ce qui est attendu d'eux. En nous appuyant uniquement sur quatre définitions, nous risquons de limiter la clarté de nos analyses.

Il aurait également été intéressant de varier l'ordre des examens (IRM et TEP), afin de minimiser les biais potentiels liés à la fatigue que peuvent ressentir les participants lorsqu'ils sont soumis à la TEP. Enfin, certains critères d'inclusion, tels que celui concernant les cheveux, auraient pu être supprimés pour permettre une plus grande diversité dans la sélection des participants.

Plusieurs autres approches et méthodes pourraient être considérées afin de mieux étudier les concepts présentés dans le cadre de ce mémoire. Tout d’abord, il serait pertinent d’étudier comment ces expériences intérieures évoluent au fil du temps dans différentes conditions, par exemple, en réponse à la méditation, à des pratiques de pleine conscience, ou en cas de pathologies comme la dépression, l’anxiété ou l’aphasie, ou bien sous l’influence de substances psychoactives. En complément des mesures quantitatives que nous fournissent les questionnaires auto-rapportés et les techniques de neuro-imagerie, des approches qualitatives pourraient enrichir la compréhension de ces expériences, en permettant une exploration du contenu de ces phénomènes. Enfin, il serait également intéressant d’étudier ces concepts en temps réels avec la méthode de neurofeedback afin de permettre aux participants de visualiser leur propre activité cérébrale en temps réels.

L’étude des ECAs, en lien avec des expériences intérieures comme le discours interne, l’imagerie mentale visuelle et l’orientation des pensées, ouvre de nombreuses pistes pour l’avenir. Tout d’abord, les interfaces cerveau-ordinateur (*Brain Computer Interface* – BCI) utilisent des techniques de neuro-imagerie ou des capteurs EEG pour détecter des signaux cérébraux spécifiques et permettraient de développer des systèmes qui permettent aux patients de répondre à des questions ou de choisir des options par la pensée (Pichiorri & Mattia, 2020). Les BCI sont déjà utilisées auprès des patients en ECA dans le domaine de recherche puisqu’elles permettent également d’évaluer plus précisément leurs capacités cognitives résiduelles (Owen et al., 2006). Une étude approfondie des réseaux correspondant aux différentes expériences intérieures pourrait également offrir d’autres perspectives pour développer des interventions thérapeutiques et diagnostiques innovantes, comme nous avons pu le voir avec l’utilisation des réseaux neuronaux au repos dans l’aide au diagnostic de cette population (Demertzi et al., 2015). Ces recherches peuvent améliorer la communication, via les BCI notamment, et offrir une meilleure compréhension des mécanismes de conscience altérée.

5. Conclusions

En résumé, nos résultats n’ont pas pu mettre en évidence de profil d’expériences intérieures dominant, bien que le discours interne semble avoir un contenu se dirigeant davantage vers nous-même et qu’il diminue avec l’âge. Le discours interne pourrait d’ailleurs être sous-tendu par le DLPFC gauche, suggérant que ce type d’expériences intérieures utilise les mêmes réseaux neuronaux que ceux du langage. La désactivation du DMN et du CVP

lorsque les participants sont engagés dans des pensées orientées vers l'extérieur pourrait être le reflet du mode de compétition des réseaux cérébraux, mais aussi de la diminution des pensées orientées vers soi. Enfin, le fait que les pensées orientées vers l'extérieur aient été associées à une activité réduite dans le réseau fronto-pariétal droit pourrait être expliqué par le fait que cette région particulière sous-tendrait la conscience de soi physique. L'étude des réseaux neuronaux de la conscience, notamment à travers l'analyse des réseaux au repos en lien avec les expériences de conscience altérée, est essentielle pour mieux comprendre ces états chez les patients non communicants et pour enrichir notre compréhension de la conscience dans la population générale.

Bibliographie

- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1-2), 29-37.
<https://doi.org/10.3109/00207459008994241>
- Alderson-Day, B., & Fernyhough, C. (2015). Inner speech : Development, cognitive functions, phenomenology, and neurobiology. *Psychological Bulletin*, 141(5), 931-965. <https://doi.org/10.1037/bul0000021>
- Alderson-Day, B., Mitrenga, K., Wilkinson, S., McCarthy-Jones, S., & Fernyhough, C. (2018). The varieties of inner speech questionnaire – Revised (VISQ-R) : Replicating and refining links between inner speech and psychopathology. *Consciousness and Cognition*, 65, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.07.001>
- Alderson-Day, B., Moffatt, J., Bernini, M., Mitrenga, K., Yao, B., & Fernyhough, C. (2020). Processing Speech and Thoughts during Silent Reading : Direct Reference Effects for Speech by Fictional Characters in Voice-Selective Auditory Cortex and a Theory-of-Mind Network. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(9), 1637-1653.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_01571
- Amemiya, K., & Naito, E. (2016). Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement. *Cortex*, 78, 15-30.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.01.017>
- Andersson, J.-L.-R., Hutton, C., Ashburner, J., Turner, R., & Friston, K. (2001). Modeling Geometric Deformations in EPI Time Series. *NeuroImage*, 13(5), 903-919.
<https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0746>
- Andrews-Hanna, J.-R., Reidler, J.-S., Huang, C., & Buckner, R.-L. (2010). Evidence for the

- Default Network's Role in Spontaneous Cognition. *Journal of Neurophysiology*, 104(1), 322-335. <https://doi.org/10.1152/jn.00830.2009>
- Aubinet, C., Cassol, H., Gosseries, O., Bahri, M.-A., Larroque, S.-K., Majerus, S., Martial, C., Martens, G., Carrière, M., Chatelle, C., Laureys, S., & Thibaut, A. (2020). Brain Metabolism but Not Gray Matter Volume Underlies the Presence of Language Function in the Minimally Conscious State (MCS) : MCS+ Versus MCS– Neuroimaging Differences. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 34(2), 172-184. <https://doi.org/10.1177/1545968319899914>
- Aubinet, C., Chatelle, C., Gosseries, O., Carrière, M., Laureys, S., & Majerus, S. (2022). Residual implicit and explicit language abilities in patients with disorders of consciousness : A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 132, 391-409. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.12.001>
- Aubinet, C., Murphy, L., Bahri, M.-A., Larroque, S.-K., Cassol, H., Annen, J., Carrière, M., Wannez, S., Thibaut, A., Laureys, S., & Gosseries, O. (2018). Brain, Behavior, and Cognitive Interplay in Disorders of Consciousness : A Multiple Case Study. *Frontiers in Neurology*, 9, 665. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00665>
- Aubinet, C., Panda, R., Larroque, S.-K., Cassol, H., Bahri, M.-A., Carrière, M., Wannez, S., Majerus, S., Laureys, S., & Thibaut, A. (2019). Reappearance of Command-Following Is Associated With the Recovery of Language and Internal-Awareness Networks : A Longitudinal Multiple-Case Report. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 13, 8. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2019.00008>
- Baars, B.-J. (2002). The conscious access hypothesis : Origins and recent evidence. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 47-52. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01819-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01819-2)
- Baars, B.-J., Ramsøy, T.-Z., & Laureys, S. (2003). Brain, conscious experience and the

observing self. *Trends in Neurosciences*, 26(12), 671-675.

<https://doi.org/10.1016/j.tins.2003.09.015>

Banich, M.-T., & Compton, R.-J. (2018a). Language. In *Cognitive Neuroscience* (4th Ed, p. 223-255). Cambridge University Press.

Banich, M.-T., & Compton, R.-J. (2018b). Methods. In *Cognitive Neuroscience* (4th Ed, p. 68-98). Cambridge University Press.

Bayne, T., Frohlich, J., Cusack, R., Moser, J., & Naci, L. (2023). Consciousness in the cradle : On the emergence of infant experience. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(12), 1135-1149. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.08.018>

Beck, A.-T., Steer, R.-A., Ball, R., & Ranieri, W.-F. (1996). Comparison of Beck Depression Inventories-IA and-II in Psychiatric Outpatients. *Journal of Personality Assessment*, 67(3), 588-597. https://doi.org/10.1207/s15327752jpa6703_13

Bermúdez, J.-L. (2018). Inner Speech, determinacy, and thinking consciously about thoughts. In P. Langland-Hassan & A. Vicente (Éds.), *Inner Speech : New Voices* (p. 199-220). Oxford University Press.

Bird, C.-M., Capponi, C., King, J.-A., Doeller, C.-F., & Burgess, N. (2010). Establishing the Boundaries : The Hippocampal Contribution to Imagining Scenes. *The Journal of Neuroscience*, 30(35), 11688-11695. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0723-10.2010>

Blumenfeld, H. (2016). Neuroanatomical Basis of Consciousness. In *The Neurology of Consciousness* (p. 3-29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800948-2.00001-7>

Bodart, O., Laureys, S., & Gosseries, O. (2013). Coma and Disorders of Consciousness : Scientific Advances and Practical Considerations for Clinicians. *Seminars in*

Neurology, 33(02), 083-090. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1348965>

Boly, M., Massimini, M., Tsuchiya, N., Postle, B.-R., Koch, C., & Tononi, G. (2017). Are the Neural Correlates of Consciousness in the Front or in the Back of the Cerebral Cortex? Clinical and Neuroimaging Evidence. *The Journal of Neuroscience*, 37(40), 9603-9613. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3218-16.2017>

Bonhage, C., Weber, F., Exner, C., & Kanske, P. (2016). Thinking about thinking : Neural mechanisms and effects on memory. *NeuroImage*, 127, 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.067>

Brown, R., Lau, H., & LeDoux, J.-E. (2019). Understanding the Higher-Order Approach to Consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(9), 754-768. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.06.009>

Bruno, M.-A., Vanhaudenhuyse, A., Thibaut, A., Moonen, G., & Laureys, S. (2011). From unresponsive wakefulness to minimally conscious PLUS and functional locked-in syndromes : Recent advances in our understanding of disorders of consciousness. *Journal of Neurology*, 258(7), 1373-1384. <https://doi.org/10.1007/s00415-011-6114-x>

Buyse, D.-J., Reynolds, C.-F., Monk, T.-H., Berman, S.-R., & Kupfer, D.-J. (1989). The Pittsburgh sleep quality index : A new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research*, 28(2), 193-213. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(89\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4)

Cassol, H., Aubinet, C., Thibaut, A., Wannez, S., Martial, C., Martens, G., & Laureys, S. (2018). Diagnostic, pronostic et traitements des troubles de la conscience. *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie*, 18(103), 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.npg.2017.04.001>

Chennu, S., Annen, J., Wannez, S., Thibaut, A., Chatelle, C., Cassol, H., Martens, G.,

- Schnakers, C., Gosseries, O., Menon, D., & Laureys, S. (2017). Brain networks predict metabolism, diagnosis and prognosis at the bedside in disorders of consciousness. *Brain*, 140(8), 2120-2132. <https://doi.org/10.1093/brain/awx163>
- Christoff, K., Gordon, A.-M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J.-W. (2009). Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8719-8724. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900234106>
- Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Nazarian, B., Roth, M., Anton, J., & Assaiante, C. (2014). Boosted activation of right inferior frontoparietal network : A basis for illusory movement awareness. *Human Brain Mapping*, 35(10), 5166-5178. <https://doi.org/10.1002/hbm.22541>
- Claassen, J., Doyle, K., Matory, A., Couch, C., Burger, K.-M., Velazquez, A., Okonkwo, J.-U., King, J.-R., Park, S., Agarwal, S., Roh, D., Meghani, M., Eliseyev, A., Connolly, E.-S., & Rohaut, B. (2019). Detection of Brain Activation in Unresponsive Patients with Acute Brain Injury. *New England Journal of Medicine*, 380(26), 2497-2505. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1812757>
- Corley, M., Brocklehurst, P.-H., & Moat, H.-S. (2011). Error biases in inner and overt speech : Evidence from tongue twisters. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37(1), 162-175. <https://doi.org/10.1037/a0021321>
- Dalton, D.-S., Cruickshanks, K.-J., Klein, B.-E.-K., Klein, R., Wiley, T.-L., & Nondahl, D.-M. (2003). The Impact of Hearing Loss on Quality of Life in Older Adults. *The Gerontologist*, 43(5), 661-668. <https://doi.org/10.1093/geront/43.5.661>
- Davey, C.-G., Pujol, J., & Harrison, B.-J. (2016). Mapping the self in the brain's default mode network. *NeuroImage*, 132, 390-397.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.022>

Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J.-F., Poline, J.-B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming.

Nature Neuroscience, 4(7), 752-758. <https://doi.org/10.1038/89551>

Delamillieure, P., Doucet, G., Mazoyer, B., Turbelin, M.-R., Delcroix, N., Mellet, E., Zago, L., Crivello, F., Petit, L., Tzourio-Mazoyer, N., & Joliot, M. (2010). The resting state questionnaire : An introspective questionnaire for evaluation of inner experience during the conscious resting state. *Brain Research Bulletin*, 81(6), 565-573.

<https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.11.014>

Demertzi, A., Antonopoulos, G., Heine, L., Voss, H.-U., Crone, J.-S., De Los Angeles, C., Bahri, M.-A., Di Perri, C., Vanhaudenhuyse, A., Charland-Verville, V., Kronbichler, M., Trinka, E., Phillips, C., Gomez, F., Tshibanda, L., Soddu, A., Schiff, N.-D., Whitfield-Gabrieli, S., & Laureys, S. (2015). Intrinsic functional connectivity differentiates minimally conscious from unresponsive patients. *Brain*, 138(9), 2619-2631. <https://doi.org/10.1093/brain/awv169>

Duff, E. (2008). *REX: Response Exploration for Neuroimaging Datasets* [Logiciel].

<https://www.nitrc.org/projects/rex/>

Eggebike, J., Shen, Q., Doyle, K., Der-Nigoghossian, C.-A., Panicker, L., Gonzales, I.-J., Grobois, L., Carmona, J.-C., Vrosgou, A., Kaur, A., Boehme, A., Velazquez, A., Rohaut, B., Roh, D., Agarwal, S., Park, S., Connolly, E.-S., & Claassen, J. (2022). Cognitive-motor dissociation and time to functional recovery in patients with acute brain injury in the USA : A prospective observational cohort study. *The Lancet Neurology*, 21(8), 704-713. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(22\)00212-5](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(22)00212-5)

Engle, R.-W., Kane, M.-J., & Tuholski, S.-W. (1999). Individual Differences in Working

- Memory Capacity and What They Tell Us About Controlled Attention, General Fluid Intelligence, and Functions of the Prefrontal Cortex. In A. Miyake & P. Shah (Éds.), *Models of Working Memory* (1^{re} éd., p. 102-134). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.007>
- Fair, D.-A., Cohen, A.-L., Power, J.-D., Dosenbach, N.-U.-F., Church, J.-A., Miezin, F.-M., Schlaggar, B.-L., & Petersen, S.-E. (2009). Functional Brain Networks Develop from a “Local to Distributed” Organization. *PLoS Computational Biology*, 5(5), e1000381.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000381>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1 : Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149-1160. <https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149>
- Fernyhough, C., & Borghi, A.-M. (2023). Inner speech as language process and cognitive tool. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(12), 1180-1193.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.08.014>
- Flinker, A., Korzeniewska, A., Shestiyuk, A.-Y., Franaszczuk, P.-J., Dronkers, N.-F., Knight, R.-T., & Crone, N.-E. (2015). Redefining the role of Broca’s area in speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(9), 2871-2875.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1414491112>
- Frankland, S.-M., & Greene, J.-D. (2020). Concepts and Compositionality : In Search of the Brain’s Language of Thought. *Annual Review of Psychology*, 71(1), 273-303.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122216-011829>
- Freeston, M.-H., Ladouceur, R., Thibodeau, N., Gagnon, F., & Rheume, J. (1994). L’inventaire d’anxiété de Beck. Propriétés psychométriques d’une traduction française. *L’Encéphale: Revue de psychiatrie clinique biologique et thérapeutique*,

47-55.

Friederici, A.-D., & Gierhan, S.-M. (2013). The language network. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(2), 250-254. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.10.002>

Friston, K.-J., Frith, C.-D., Liddle, P.-F., & Frackowiak, R.-S.-J. (1991). Investigating a network model of word generation with positron emission tomography. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 244(1310), 101-106. <https://doi.org/10.1098/rspb.1991.0057>

Friston, K.-J., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R.-S.-J., & Turner, R. (1996). Movement-Related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35(3), 346-355. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910350312>

Friston, K.-J., Ashburner, J., Frith, C.-D., Poline, J.-B., Heather, J.-D., & Frackowiak, R.-S.-J. (1995). Spatial registration and normalization of images. *Human Brain Mapping*, 3(3), 165-189. <https://doi.org/10.1002/hbm.460030303>

Giambra, L.-M. (2000). Frequency and Intensity of Daydreaming : Age Changes and Age Differences from Late Adolescent to the Old-Old. *Imagination, Cognition and Personality*, 19(3), 229-267. <https://doi.org/10.2190/XN4W-1CRE-B0MH-84XT>

Gosseries, O., Zasler, N.-D., & Laureys, S. (2014). Recent advances in disorders of consciousness : Focus on the diagnosis. *Brain Injury*, 28(9), 1141-1150. <https://doi.org/10.3109/02699052.2014.920522>

Grady, C.-L., Springer, M.-V., Hongwanishkul, D., McIntosh, A.-R., & Winocur, G. (2006). Age-related Changes in Brain Activity across the Adult Lifespan. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(2), 227-241. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.2.227>

Granato, G., Borghi, A.-M., & Baldassarre, G. (2020). A computational model of language functions in flexible goal-directed behaviour. *Scientific Reports*, 10(1), 21623.

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-78252-y>

- Guedj, E., Varrone, A., Boellaard, R., Albert, N.-L., Barthel, H., Van Berckel, B., Brendel, M., Cecchin, D., Ekmekcioglu, O., Garibotto, V., Lammertsma, A.-A., Law, I., Peñuelas, I., Semah, F., Traub-Weidinger, T., Van De Giessen, E., Van Weehaeghe, D., & Morbelli, S. (2022). EANM procedure guidelines for brain PET imaging using [18F]FDG, version 3. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49(2), 632-651. <https://doi.org/10.1007/s00259-021-05603-w>
- Gui, P., Jiang, Y., Zang, D., Qi, Z., Tan, J., Tanigawa, H., Jiang, J., Wen, Y., Xu, L., Zhao, J., Mao, Y., Poo, M., Ding, N., Dehaene, S., Wu, X., & Wang, L. (2020). Assessing the depth of language processing in patients with disorders of consciousness. *Nature Neuroscience*, 23(6), 761-770. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0639-1>
- Heavey, C.-L., & Hurlburt, R.-T. (2008). The phenomena of inner experience. *Consciousness and Cognition*, 17(3), 798-810. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.12.006>
- Heavey, C.-L., Moynihan, S.-A., Brouwers, V.-P., Lapping-Carr, L., Krumm, A.-E., Kelsey, J.-M., Turner, D.-K., & Hurlburt, R.-T. (2019). Measuring the Frequency of Inner-Experience Characteristics by Self-Report : The Nevada Inner Experience Questionnaire. *Frontiers in Psychology*, 9, 2615. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02615>
- Heine, L., Soddu, A., Gómez, F., Vanhaudenhuyse, A., Tshibanda, L., Thonnard, M., Charland-Verville, V., Kirsch, M., Laureys, S., & Demertzi, A. (2012). Resting State Networks and Consciousness. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00295>
- Hurlburt, R.-T., & Akhter, S.-A. (2006). The Descriptive Experience Sampling method. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 5(3-4), 271-301.

<https://doi.org/10.1007/s11097-006-9024-0>

- Hurlburt, R.-T., Heavey, C.-L., Lapping-Carr, L., Krumm, A.-E., Moynihan, S.-A., Kaneshiro, C., Brouwers, V.-P., Turner, D.-K., & Kelsey, J.-M. (2022). Measuring the Frequency of Inner-Experience Characteristics. *Perspectives on Psychological Science*, 17(2), 559-571. <https://doi.org/10.1177/1745691621990379>
- 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>
- Johns, M.-W. (1991). A New Method for Measuring Daytime Sleepiness : The Epworth Sleepiness Scale. *Sleep*, 14(6), 540-545. <https://doi.org/10.1093/sleep/14.6.540>
- Jordão, M., Ferreira-Santos, F., Pinho, M.-S., & St. Jacques, P.-L. (2019). Meta-analysis of aging effects in mind wandering : Methodological and sociodemographic factors. *Psychology and Aging*, 34(4), 531-544. <https://doi.org/10.1037/pag0000356>
- King, N.-S., Crawford, S., Wenden, F.-J., Moss, N.-E.-G., & Wade, D.-T. (1995). The Rivermead Post Concussion Symptoms Questionnaire : A measure of symptoms commonly experienced after head injury and its reliability. *Journal of Neurology*, 242(9), 587-592. <https://doi.org/10.1007/BF00868811>
- Langland-Hassan, P., Gauker, C., Richardson, M.-J., Dietz, A., & Faries, F.-R. (2017). Metacognitive deficits in categorization tasks in a population with impaired inner speech. *Acta Psychologica*, 181, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.10.004>
- Majerus, S., Bruno, M.-A., Schnakers, C., Giacino, J.-T., & Laureys, S. (2009). The problem of aphasia in the assessment of consciousness in brain-damaged patients. In *Progress in Brain Research* (Vol. 177, p. 49-61). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(09\)17705-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(09)17705-1)
- Martial, C., Cassol, H., Laureys, S., & Gosseries, O. (2020). Near-Death Experience as a

- Probe to Explore (Disconnected) Consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(3), 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.12.010>
- Massimo, N., Daniela, M., & Sara M. (2012). Cognitive Reserve Index questionnaire (CRIq) : A new instrument for measuring cognitive reserve. *Aging Clinical and Experimental Research*, 24(3). <https://doi.org/10.3275/7800>
- MathWorks. (2023). *MATLAB* (Version Version 2023b) [Logiciel]. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Mattis, S. (1988). Dementia rating scale : Professional manual. *Psychological Assessment Resources*.
- Mattson, S. & International Commission on Radiological Protection (Éds.). (2015). *Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals : A compendium of current information related to frequently used substances*. SAGE.
- Mazoyer, B., Zago, L., Mellet, E., Bricogne, S., Etard, O., Houdé, O., Crivello, F., Joliot, M., Petit, L., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Cortical networks for working memory and executive functions sustain the conscious resting state in man. *Brain Research Bulletin*, 54(3), 287-298. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(00\)00437-8](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(00)00437-8)
- McCarthy-Jones, S., & Fernyhough, C. (2011). The varieties of inner speech : Links between quality of inner speech and psychopathological variables in a sample of young adults. *Consciousness and Cognition*, 20(4), 1586-1593. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.005>
- McGuire, P.-K., Silbersweig, D.-A., Murray, R.-M., David, A.-S., Frackowiak, R.-S.-J., & Frith, C.-D. (1995). Functional anatomy of inner speech and auditory verbal imagery. *Schizophrenia Research*, 15(1-2), 91-92. [https://doi.org/10.1016/0920-9964\(95\)95284-G](https://doi.org/10.1016/0920-9964(95)95284-G)

- Miguens, S. (2022). Animal Brains and the Work of Words : Daniel Dennett on Natural Language and the Human Mind. *Topoi*, 41(3), 599-607.
<https://doi.org/10.1007/s11245-021-09745-2>
- Miller, S.-E. (2022). Vocabulary and Early Executive Function during Early Childhood : Revisiting Questions on the Nature of Thought and Language – Commentary on Bruce and Bell. *Human Development*, 66(3), 188-191. <https://doi.org/10.1159/000525361>
- Mitsubishi, S., Hirata, S., & Okuzumi, H. (2018). Role of inner speech on the Luria hand test. *Cogent Psychology*, 5(1), 1449485. <https://doi.org/10.1080/23311908.2018.1449485>
- Morin, A. (1993). Self-talk and Self-awareness : On the Nature of the Relation. *The Journal of Mind and Behavior*, 14(3), 223-234.
- Morin, A. (2006). Levels of consciousness and self-awareness : A comparison and integration of various neurocognitive views. *Consciousness and Cognition*, 15(2), 358-371.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2005.09.006>
- Morin, A. (2011). Self-Awareness Part 2 : Neuroanatomy and Importance of Inner Speech: Self-Awareness. *Social and Personality Psychology Compass*, 5(12), 1004-1017.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-9004.2011.00410.x>
- Morin, A., & Everett, J. (1990). Inner speech as a mediator of self-awareness, self-consciousness, and self-knowledge : An hypothesis. *New Ideas in Psychology*, 8(3), 337-356. [https://doi.org/10.1016/0732-118X\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0732-118X(94)90020-5)
- Nalborczyk, L., Grandchamp, R., Koster, E.-H.-W., Perrone-Bertolotti, M., & Lœvenbruck, H. (2020). Can we decode phonetic features in inner speech using surface electromyography? *PLOS ONE*, 15(5), e0233282.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233282>
- Nedergaard, J.-S.-K., & Lupyan, G. (s. d.). *Not Everyone Has an Inner Voice : Behavioral*

Consequences of Anendophasia.

Nedergaard, J., Skewes, J.-C., & Wallentin, M. (2023). “Stay focused!” : The role of inner speech in maintaining attention during a boring task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 49(4), 451-464.

<https://doi.org/10.1037/xhp0001112>

Nejati, V., Sharifian, M., Famininejad, Z., Salehinejad, M., & Mahdian, S. (2024). The neural structures of theory of mind are valence-sensitive : Evidence from three tDCS studies. *Journal of Neural Transmission*. <https://doi.org/10.1007/s00702-024-02808-9>

Nieto-Castanon, A. (2020a). FMRI denoising pipeline. In *Handbook of functional connectivity Magnetic Resonance Imaging methods in CONN* (p. 17-25). Hilbert Press.

Nieto-Castanon, A. (2020b). FMRI minimal preprocessing pipeline. In *Handbook of functional connectivity Magnetic Resonance Imaging methods in CONN* (p. 3-16). Hilbert Press.

Nieto-Castanon, A. (2020c). General Linear Model. In *Handbook of functional connectivity Magnetic Resonance Imaging methods in CONN* (p. 63-82). Hilbert Press.

Nieto-Castanon, A. (2022). *Preparing fMRI Data for Statistical Analysis* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.13564>

Nieto-Castanon, A., & Whitfield-Gabrieli, S. (2022). *CONN functional connectivity toolbox : RRID SCR_009550, release 22* (22^e éd.). Hilbert Press. <https://doi.org/10.56441/hilbertpress.2246.5840>

Norton, L., Hutchison, R.-M., Young, G.-B., Lee, D.-H., Sharpe, M.-D., & Mirsattari, S.-M. (2012). Disruptions of functional connectivity in the default mode network of comatose patients. *Neurology*, 78(3), 175-181.

<https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e31823fcd61>

- Oldfield, R.-C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Overath, T., McDermott, J.-H., Zarate, J.-M., & Poeppel, D. (2015). The cortical analysis of speech-specific temporal structure revealed by responses to sound quilts. *Nature Neuroscience*, 18(6), 903-911. <https://doi.org/10.1038/nn.4021>
- Owen, A.-M., Coleman, M.-R., Boly, M., Davis, M.-H., Laureys, S., & Pickard, J.-D. (2006). Detecting Awareness in the Vegetative State. *Science*, 313(5792), 1402-1402. <https://doi.org/10.1126/science.1130197>
- 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>
- Pearson, J., Naselaris, T., Holmes, E.-A., & Kosslyn, S.-M. (2015). Mental Imagery : Functional Mechanisms and Clinical Applications. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 590-602. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.08.003>
- Peper, A. (2020). A general theory of consciousness I : *Consciousness and adaptation*. *Communicative & Integrative Biology*, 13(1), 6-21. <https://doi.org/10.1080/19420889.2020.1713967>
- Peper, A. (2022). A general theory of consciousness II : *The language problem*. *Communicative & Integrative Biology*, 15(1), 182-189. <https://doi.org/10.1080/19420889.2022.2101194>
- Pérée, F.-P. (2021). La régression linéaire. In *Problèmes statistiques et utilisation de logiciels*. (p. 165-196). Presses Universitaires de Liège.

- Piani, M.-C., Gerber, B.-S., Koenig, T., Morishima, Y., Nordgaard, J., & Jandl, M. (2024). Mapping the pre-reflective experience of “self” to the brain—An ERP study. *Consciousness and Cognition*, 119, 103654. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2024.103654>
- Pichiorri, F., & Mattia, D. (2020). Brain-computer interfaces in neurologic rehabilitation practice. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 168, p. 101-116). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63934-9.00009-3>
- Ponticorvo, S., Manara, R., Cassandro, E., Canna, A., Scarpa, A., Troisi, D., Cassandro, C., Cuoco, S., Cappiello, A., Pellecchia, M.-T., Salle, F.-D., & Esposito, F. (2022). Cross-modal connectivity effects in age-related hearing loss. *Neurobiology of Aging*, 111, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2021.09.024>
- Power, J.-D., Mitra, A., Laumann, T.-O., Snyder, A.-Z., Schlaggar, B.-L., & Petersen, S.-E. (2014). Methods to detect, characterize, and remove motion artifact in resting state fMRI. *NeuroImage*, 84, 320-341. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.048>
- Racy, F., & Morin, A. (2024). Relationships between Self-Talk, Inner Speech, Mind Wandering, Mindfulness, Self-Concept Clarity, and Self-Regulation in University Students. *Behavioral Sciences*, 14(1), 55. <https://doi.org/10.3390/bs14010055>
- 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>
- Rajkumar, R., Farrher, E., Mauler, J., Sripad, P., Régio Brambilla, C., Rota Kops, E., Scheins, J., Dammers, J., Lerche, C., Langen, K., Herzog, H., Biswal, B., Shah, N.-J., & Neuner, I. (2021). Comparison of EEG microstates with resting state fMRI and FDG-PET measures in the default mode network via simultaneously recorded trimodal

- (PET/MR/EEG) data. *Human Brain Mapping*, 42(13), 4122-4133.
<https://doi.org/10.1002/hbm.24429>
- Rolls, E.-T., Joliot, M., & Tzourio-Mazoyer, N. (2015). Implementation of a new parcellation of the orbitofrontal cortex in the automated anatomical labeling atlas. *NeuroImage*, 122, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.07.075>
- Sala, A. (2022). Poster Presentations. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 42(1_suppl), 108-273. <https://doi.org/10.1177/0271678X221096357>
- Sanz, L.-R.-D., Laureys, S., & Gosseries, O. (2018). *Disorders of consciousness : Behavioral and neuroimaging studies*.
- Schlegel, A., Kohler, P.-J., Fogelson, S.-V., Alexander, P., Konuthula, D., & Tse, P.-U. (2013). Network structure and dynamics of the mental workspace. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(40), 16277-16282.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1311149110>
- Schnakers, C., & Majerus, S. (2011). Évaluation comportementale et diagnostic des états de conscience altérée. In *Coma et états de conscience altérée* (p. 3-16). Springer.
- Schwarz, C.-G., Senjem, M.-L., Gunter, J.-L., Tosakulwong, N., Weigand, S.-D., Kemp, B.-J., Spychalla, A.-J., Vemuri, P., Petersen, R.-C., Lowe, V.-J., & Jack, C.-R. (2017). Optimizing PiB-PET SUVR change-over-time measurement by a large-scale analysis of longitudinal reliability, plausibility, separability, and correlation with MMSE. *NeuroImage*, 144, 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.08.056>
- Seth, A.-K., & Bayne, T. (2022). Theories of consciousness. *Nature Reviews Neuroscience*, 23(7), 439-452. <https://doi.org/10.1038/s41583-022-00587-4>
- Shergill, S.-S., Brammer, M.-J., Fukuda, R., Bullmore, E., Amaro, E., Murray, R.-M., & McGuire, P.-K. (2002). Modulation of activity in temporal cortex during generation of

inner speech. *Human Brain Mapping*, 16(4), 219-227.

<https://doi.org/10.1002/hbm.10046>

Shigemune, Y., Tsukiura, T., Nouchi, R., Kambara, T., & Kawashima, R. (2017). Neural mechanisms underlying the reward-related enhancement of motivation when remembering episodic memories with high difficulty. *Human Brain Mapping*, 38(7), 3428-3443. <https://doi.org/10.1002/hbm.23599>

Skipper, J.-I. (2022). A voice without a mouth no more : The neurobiology of language and consciousness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 140, 104772.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104772>

Spagna, A., Hajhajate, D., Liu, J., & Bartolomeo, P. (2021). Visual mental imagery engages the left fusiform gyrus, but not the early visual cortex : A meta-analysis of neuroimaging evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 122, 201-217.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.029>

Stawarczyk, D., Cassol, H., & D'Argembeau, A. (2013). Phenomenology of future-oriented mind-wandering episodes. *Frontiers in Psychology*, 4.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00425>

Stawarczyk, D., Majerus, S., Maj, M., Van Der Linden, M., & D'Argembeau, A. (2011).

Mind-wandering : Phenomenology and function as assessed with a novel experience sampling method. *Acta Psychologica*, 136(3), 370-381.

<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.01.002>

Stawarczyk, D., Majerus, S., Van Der Linden, M., & D'Argembeau, A. (2012). Using the Daydreaming Frequency Scale to Investigate the Relationships between Mind-Wandering, Psychological Well-Being, and Present-Moment Awareness. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00363>

- Stender, J., Gosseries, O., Bruno, M.-A., Charland-Verville, V., Vanhaudenhuyse, A., Demertzi, A., Chatelle, C., Thonnard, M., Thibaut, A., Heine, L., Soddu, A., Boly, M., Schnakers, C., Gjedde, A., & Laureys, S. (2014). Diagnostic precision of PET imaging and functional MRI in disorders of consciousness : A clinical validation study. *The Lancet*, 384(9942), 514-522. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60042-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60042-8)
- Stender, J., Mortensen, K.-N., Thibaut, A., Darkner, S., Laureys, S., Gjedde, A., & Kupers, R. (2016). The Minimal Energetic Requirement of Sustained Awareness after Brain Injury. *Current Biology*, 26(11), 1494-1499. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.024>
- Takeuchi, N., Sudo, T., Oouchida, Y., Mori, T., & Izumi, S.-I. (2019). Synchronous Neural Oscillation Between the Right Inferior Fronto-Parietal Cortices Contributes to Body Awareness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 330. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00330>
- Tellegen, A., & Atkinson, G. (1974). Openness to absorbing and self-altering experiences (« absorption »), a trait related to hypnotic susceptibility. *Journal of Abnormal Psychology*, 83(3), 268-277. <https://doi.org/10.1037/h0036681>
- The Jamovi Project. (2024). *Jamovi* (Version Version 2.5) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org>
- Thibaut, A., Panda, R., Annen, J., Sanz, L.-R.-D., Naccache, L., Martial, C., Chatelle, C., Aubinet, C., Bonin, E.-A.-C., Barra, A., Briand, M., Cecconi, B., Wannez, S., Stender, J., Laureys, S., & Gosseries, O. (2021). Preservation of Brain Activity in Unresponsive Patients Identifies MCS Star. *Annals of Neurology*, 90(1), 89-100. <https://doi.org/10.1002/ana.26095>
- Thie, J.-A. (2004). Understanding the Standardized Uptake Value, Its Methods, and Implications for Usage. *Journal of Nuclear Medicine*, 45(9), 1431-1434.

- Thomason, M.-E., Dennis, E.-L., Joshi, A.-A., Joshi, S.-H., Dinov, I.-D., Chang, C., Henry, M.-L., Johnson, R.-F., Thompson, P.-M., Toga, A.-W., Glover, G.-H., Van Horn, J.-D., & Gotlib, I.-H. (2011). Resting-state fMRI can reliably map neural networks in children. *NeuroImage*, 55(1), 165-175.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.080>
- Tononi, G., Boly, M., Massimini, M., & Koch, C. (2016). Integrated information theory : From consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(7), 450-461. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.44>
- Unal, A., Altug, F., Erden, A., Cavlak, U., & Senol, H. (2021). Validity and reliability of the Body Awareness Questionnaire in patients with non-specific chronic low back pain. *Acta Neurologica Belgica*, 121(3), 701-705. <https://doi.org/10.1007/s13760-020-01399-y>
- Vanhaudenhuyse, A., Demertzi, A., Schabus, M., Noirhomme, Q., Bredart, S., Boly, M., Phillips, C., Soddu, A., Luxen, A., Moonen, G., & Laureys, S. (2011). Two Distinct Neuronal Networks Mediate the Awareness of Environment and of Self. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(3), 570-578. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21488>
- Verhaeghen, P., & Mirabito, G. (2021). When you are talking to yourself, is anybody listening? The relationship between inner speech, self-awareness, wellbeing, and multiple aspects of self-regulation. *International Journal of Personality Psychology*, 7, 8-24. <https://doi.org/10.21827/ijpp.7.37354>
- Vogeley, K., & Fink, G.-R. (2003). Neural correlates of the first-person-perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 38-42. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00003-7)
- Wadams, A., Suting, L., Lindsey, A., & Mozeiko, J. (2022). Metacognitive Treatment in Acquired Brain Injury and Its Applicability to Aphasia : A Systematic Review.

Frontiers in Rehabilitation Sciences, 3, 813416.

<https://doi.org/10.3389/fresc.2022.813416>

Wang, Y., Gao, H., & Qi, M. (2023). Left dorsolateral prefrontal cortex activation can accelerate stress recovery : A repetitive transcranial stimulation study.

Psychophysiology, 60(10), e14352. <https://doi.org/10.1111/psyp.14352>

Whitfield-Gabrieli, S., Nieto-Castanon, A., & Ghosh, S. (2011). *Artifact detection tools (ART)* 7(19). Cambridge, MA.

Wong, A., Nyenhuis, D., Black, S.-E., Law, L.-S.-N., Lo, E.-S.-K., Kwan, P.-W.-L., Au, L., Chan, A.-Y.-Y., Wong, L.-K.-S., Nasreddine, Z., & Mok, V. (2015). Montreal Cognitive Assessment 5-Minute Protocol Is a Brief, Valid, Reliable, and Feasible Cognitive Screen for Telephone Administration. *Stroke*, 46(4), 1059-1064.

<https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.007253>

Worsley, K.-J., Marrett, S., Neelin, P., Vandal, A.-C., Friston, K.-J., & Evans, A.-C. (1996).

A unified statistical approach for determining significant signals in images of cerebral activation. *Human Brain Mapping*, 4(1), 58-73. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1996\)4:1<58::AID-HBM4>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1996)4:1<58::AID-HBM4>3.0.CO;2-O)

Wu, Y., Zhang, H., Shen, Q., Jiang, X., Yuan, X., Li, M., Chen, M., Zhou, J., & Cui, J.

(2024). Exploring the neurocognitive correlates of suicidal ideation in major depressive disorder : The role of frontoparietal and default mode networks. *Journal of Psychiatric Research*, 177, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2024.07.009>

Zhou, X., & Lei, X. (2018). Wandering Minds with Wandering Brain Networks.

Neuroscience Bulletin, 34(6), 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s12264-018-0278-7>

Annexes

1. Annexe A : Liste complète des critères d'exclusion.

Contre-indications de la TEP ou IRM	<ul style="list-style-type: none"> - Claustrophobie - Présence de pacemakers, clips d'anévrismes, valves cardiaques artificielles, implants auditifs, fragments métalliques ou objets étrangers dans les yeux, la peau, le corps, implants de hanche incompatibles avec l'IRM - Grossesse ou allaitement - Utilisation de médicaments prescrits ayant un impact sur le fonctionnement cérébral tels que les sédatifs et psychotropes, dans le contexte d'une maladie neurologique, psychiatrique ou d'un trouble du sommeil - Présence ou antécédent de diabète (de type 1 ou 2 traités à l'insuline et type 2 traité avec un médicament oral sont acceptés) et hyperglycémie - Chimiothérapie actuelle ou dans l'année précédente
Pathologies neurologiques	<p>Présence ou antécédent de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Trouble de la conscience - Chirurgie cérébrale - Thérapie par radiation cérébrale - Accident vasculaire cérébral - Traumatisme crânien - Maladie neurologique dégénérative - Sévère athérosclérose - Antécédent de crise après l'âge de 3 ans - Antécédent familial de maladie neurologique dégénérative avec un début avant l'âge de 65 ans
Pathologiques psychiatriques	<ul style="list-style-type: none"> - Antécédent de psychoses ou d'utilisation chronique d'antipsychotiques dans le contexte d'une pathologie psychiatrique - Antécédent de dépression majeure avec hospitalisation - Antécédent récent (1 an) ou actuelle pathologie psychiatrique
Abus de substance	<p>Antécédent récent (1 an) ou actuel abus/dépendance d'alcool ou de nicotine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Consommation d'alcool supérieure à 14 unités par semaine - Consommation de plus de 10 cigarettes par jour

	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation de cannabis supérieure à une fois par mois durant l'année écoulée - Consommation de drogue illégale supérieure à une fois par mois durant l'année écoulée - Traitement en cours d'abus d'alcool ou de drogue - Antécédents ou abus prolongé d'alcool, de toxicomanie ou de dépendance.
Troubles du sommeil	<ul style="list-style-type: none"> - Antécédents récents ou actuels troubles du sommeil (insomnie, cauchemars récurrents, syndrome des jambes sans repos par exemple) - Horaires de travail variables dans les 6 derniers mois - Utilisation de somnifères prescrits
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Antécédents ou actuelles douleurs chroniques (diagnostiqués par un médecin) - Membres de la famille (liés génétiquement) déjà inclus dans l'étude

2. Annexe B : Questionnaire utilisé dans le but d'évaluer les expériences intérieures des participants.

J'étais orienté(e) vers l'extérieur (l'environnement autour de moi).
J'étais orienté(e) vers l'intérieur (sur moi-même).
J'ai imaginé une scène/un événement qui a eu lieu dans le passé.
J'ai imaginé planifier des choses dans le futur.
J'ai imaginé une scène qui n'est jamais arrivée.
J'ai imaginé entendre ma propre voix (discours interne).
J'ai eu des vraies sensations tactiles (engourdissement, tension, raideur, douleur, etc.).
J'ai eu de vraies sensations viscérales (par exemple, estomac, soif, faim, etc.).
J'ai eu de vrais goûts dans ma bouche pendant la session.
J'ai imaginé un goût pendant la session.
J'ai ressenti des émotions particulières pendant la session (bonheur, dégoût, peur, tristesse, étonnement).
J'étais plutôt observateur/-trice pendant la session.
J'étais plutôt agent dans la session.
J'ai du mal à expliquer ce à quoi je pensais pendant la session, mon esprit divaguait.
J'ai imaginé des odeurs.
Il y avait des représentations visuelles dans mes pensées.
J'ai eu de vraies sensations olfactives (odeurs).
Je pensais à l'expérience (durée, but, etc.).
À combien estimez-vous la durée de la session, en minutes ?

3. Annexe C : Liste des questionnaires et leur objectif.

Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971)	Évaluer l'utilisation préférentielle d'une main.
Cognitive Reserve Index questionnaire (Massimo Nucci et al., 2012)	Évaluer la réserve cognitive d'un individu en évaluant son parcours de vie professionnel ainsi que ses loisirs.
L'échelle de somnolence d'Epworth (Johns, 1991).	Évaluer la somnolence subjective des sujets.
Tellegen Absorption Scale (Tellegen & Atkinson, 1974)	Mesurer le niveau d'absorption d'une personne, c'est-à- dire à quel point toutes ses ressources peuvent être engagées dans une expérience.
Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (Åkerstedt & Gillberg, 1990)	Évaluer le niveau d'éveil chez les participants en utilisant une échelle allant de 1 (extrêmement alerte) à 9 (très somnolent, luttant contre le sommeil).
L'Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (Buysse et al., 1989).	Évaluer la qualité du sommeil des participants en leur attribuant un score.
Questionnaire Rivermead (King et al., 1995)	Évaluer les symptômes du syndrome post-commotionnel.

Questionnaire de contraception.

Question 1 : « Êtes-vous ménopausée ? »	
Oui, je suis ménopausée.	En quelle année avez-vous été ménopausée ?
	Avez-vous utilisé des contraceptifs hormonaux durant votre vie ? Si oui, quels sont-ils et pendant combien de temps les avez-vous utilisés ?

Non, je ne suis pas ménopausée et je prends une contraception hormonale.	Quel type de contraceptif hormonal prenez/avez-vous actuellement ?
	Pouvez-vous nous donner plus de détails (marques/ doses) ?
	Quand a eu lieu le premier jour du dernier cycle ? Combien de temps a-t-il duré ?
Non, je ne suis pas ménopausée et je ne prends pas de contraception hormonale.	Quand a eu lieu le premier jour du dernier cycle ? Combien de temps a-t-il duré ?

4. Annexe D : Organisation des différentes étapes du protocole.

Organisation des différentes étapes du protocole pour les participants amenés à passer tous les examens.

10h00 – 10h30	<ul style="list-style-type: none"> - Signature des formulaires de consentement informés - Évaluation MATTIS - Questionnaire Beck Dépression - Questionnaire Beck Anxiété
10h30 – 10h45	Une pause est proposée afin que les participants puissent manger une dernière fois.
10h45 – 12h00	Le participant remplit les différents questionnaires se trouvant dans l'Annexe C et le déroulement de l'examen IRM est expliqué au participant.
12h00 – 12h30	Le participant passe l'examen IRM.
12h30 – 13h50	Le participant termine de remplir les derniers questionnaires. Ensuite, le déroulement de l'examen EEG et TEP est expliqué.
13h50 – 14h20	Le participant est amené à faire une prise de sang.
14h20 – 15h00	Le participant est amené à passer un EEG de 10 minutes dans le noir les yeux fermés. Ensuite, il est placé sur la table de la TEP, la pièce étant toujours dans le noir. L'injection du ^{18}FDG se fait à 15h00. 30 minutes après l'injection, la lumière de la salle d'examen s'allume.
15h00 – 16h15	Après 24 minutes de TEP, le casque EEG est retiré et l'examen se poursuit pour 36 minutes.

Organisation des différentes étapes du protocole pour les participants amenés à passer la TEP uniquement.

10h30 – 11h00	<ul style="list-style-type: none"> - Signature des formulaires de consentement informés - Évaluation MATTIS - Questionnaire Beck Dépression - Questionnaire Beck Anxiété
11h00 – 14h30	Le participant remplit les différents questionnaires se trouvant dans l'Annexe C et le déroulement de l'examen TEP est expliqué au participant.
14h30 – 15h00	<ul style="list-style-type: none"> - 14h30 : le participant a les yeux fermés dans une pièce dont la lumière est éteinte - Injection du ^{18}FDG - 14h55 : le participant est placé sur la table de la TEP

15h00 – 15h10	Le participant passe l'examen TEP d'une durée de 10 minutes.
---------------	--

5. Annexe E : Données démographiques et données disponibles pour chaque participant

Le niveau d'éducation est calculé sur base du nombre d'années de scolarisation (incluant primaire, secondaire et supérieur). DI = Discours Interne. IMV = Imagerie Mentale Visuelle. PI = Pensées orientées vers l'Intérieur. PE = Pensées orientées vers l'Extérieur. Les scores viennent d'une échelle allant de 0 (aucun moment pendant la séance) à 10 (durant toute la séance). ✓=données disponibles.

Identifiant	Âge	Sexe	Niveau d'éducation	IRM	IRM				TEP	TEP			
					DI	IMV	PI	PE		DI	IMV	PI	PE
210	24	F	18	✓	6	7	1	3	Trop de mouvements				
224	65	F	14	✓	4	8	4	6	✓	5	5	7	7
246	26	F	15	✓	10	8	5	5	✓	10	10	10	2
256	74	M	16	✓	0	2	3	6	✓	0	0	3	5
329	35	F	12	✓	1	9	7	2	✓	4	4	6	3
331	72	M	19	✓	0	0	0	0	✓	7	7	7	5
354	68	M	16	✓	2	8	5	5	✓	2	2	3	7
361	33	M	21	✓	4	8	7	7	✓	5	5	7	4
377	44	M	12	✓	9	8	6	4	✓	6	6	3	7
383	73	F	17	TEP uniquement					✓	0	0	9	2
388	66	M	15	✓	0	0	0	0	✓	0	0	0	0

409	27	F	20	✓	3	1	2	7	✓	2	2	5	4
445	75	M	17	✓	0	0	3	6	✓	0	0	6	6
474	72	F	16	TEP uniquement					✓	0	0	5	5
476	58	M	17	✓	0	6	6	8	✓	0	0	8	6
490	34	M	15	✓	5	10	8	8	✓	5	5	8	1
492	19	M	15	✓	6	4	3	5	✓	8	8	8	2
520	53	F	18	✓	0	5	3	8	✓	0	0	2	10
536	60	F	15	✓	0	0	1	10	✓	0	0	1	10
582	29	F	15	✓	0	0	10	10	Trop de mouvements				
591	78	M	14	TEP uniquement					✓	0	0	2	10
593	39	M	18	✓	6	8	8	6	✓	7	7	8	2
633	70	M	12	✓	0	9	1	6	Trop de mouvements				
697	52	M	20	✓	3	4	5	5	✓	6	6	4	4
725	55	F	18	✓	0	0	4	8	✓	0	0	7	6
816	21	F	15	✓	10	2	8	7	✓	10	10	8	3

840	42	M	20	✓	0	7	6	6	✓	0	0	5	5
851	51	F	15	✓	0	9	3	9	Trop de mouvements				
867	64	M	17	✓	0	10	0	10	✓	0	0	5	5
885	23	M	17	✓	3	6	8	7	✓	7	7	7	8
919	54	F	13	✓	2	1	3	6	✓	1	1	6	5
926	31	M	21	✓	6	8	6	4	✓	3	3	3	7
958	22	M	17	✓	7	8	7	5	✓	5	5	8	6
964	63	M	15	✓	0	0	0	10	✓	0	0	0	10
980	45	M	9	✓	5	6	4	7	✓	5	5	5	7
991	62	M	16	✓	4	5	7	4	✓	2	2	3	6

6. Annexe F : Statistiques paramétriques pour chaque cluster de voxels.

FWE = Family-Wise Error. FDR=False Discovery Rate. Unc=uncorrected.

Cluster (x, y, z)	Taille	Taille p-FWE	Taille p-FDR	Taille p-unc	Pic p-FWE	Pic p-unc
DMN						
+04 +52 +28	2113	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+00 -52 +28	1092	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+50 -54 +26	91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-46 -60 +28	72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-58 -10 -22	47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+22 +36 +46	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+62 -06 -20	1	0.00	0.013827	0.013827	0.00	0.00
Réseau fronto-pariétal droit						
-50 -52 +38	700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-42 +22 +34	495	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+52 -50 +44	13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-32 +58 -02	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+30 -68 -30	4	0.00	0.000014	0.000011	0.00	0.00

+00 +38 +40	2	0.00	0.000765	0.000765	0.00	0.00
Réseau fronto-pariétal gauche						
+48 -48 +44	828	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+42 +24 +34	430	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-54 -46 +44	96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cortex visuel primaire						
+06 -82 +08	2664	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-26 -76 -12	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

7. Annexe G : Valeurs SUV et SUV_{r_{global}} sur base des quatre masques de connectivité fonctionnelle.

Identifiant	Valeurs SUV _{r_{global}} du DMN	Valeurs SUV du DMN	Valeurs SUV _{r_{global}} du réseau FP gauche	Valeurs SUV du réseau FP gauche	Valeurs SUV _{r_{global}} du réseau FP droit	Valeurs SUV du réseau FP droit	Valeurs SUV _{r_{global}} du CVP	Valeurs SUV du CVP
224	2.12	7.96	2.10	9.03	2.03	8.75	2.12	9.14
246	1.78	7.69	1.89	8.12	1.89	8.12	1.78	7.63
256	2.05	7.35	1.81	7.55	1.92	7.99	2.05	8.54
329	1.89	6.62	1.92	7.07	1.94	7.16	1.89	6.96
331	2.05	7.29	1.77	7.17	1.81	7.35	2.05	8.34
354	1.95	7.33	1.82	7.62	1.96	8.20	1.95	8.16
361	1.95	7.96	1.99	8.69	1.92	8.42	1.95	8.51
377	1.99	9.19	2.02	9.79	1.96	9.52	1.99	9.67
383	2.05	8.31	1.96	9.04	1.95	9.01	2.05	9.49
388	2.12	6.98	1.93	7.77	1.94	7.80	2.12	8.51
409	1.86	8.41	2.00	8.99	1.97	8.82	1.86	8.36
445	1.93	6.50	1.88	6.78	2.00	7.23	1.93	6.94
474	2.07	6.33	1.86	6.72	1.77	6.40	2.07	7.48
476	1.88	7.62	1.84	7.34	1.85	7.40	1.88	7.50
490	1.90	8.62	1.96	9.14	1.93	9.02	1.90	8.88
492	1.79	7.18	2.02	7.62	1.99	7.52	1.79	6.76
520	1.81	4.90	1.73	4.81	1.76	4.89	1.81	5.02
536	1.96	9.25	1.89	9.35	1.94	9.60	1.96	9.68
591	1.89	5.16	1.73	5.20	1.66	4.98	1.89	5.69
593	2.13	7.15	1.98	7.81	1.95	7.69	2.13	8.41
697	1.90	8.74	1.97	9.25	1.98	9.34	1.90	8.93
725	1.84	9.06	1.98	9.81	2.02	10.03	1.84	9.13

816	1.87	9.96	1.98	10.26	1.98	10.30	1.87	9.69
840	2.04	5.58	1.80	5.96	1.83	6.06	2.04	6.74
867	2.02	6.77	1.93	7.28	1.98	7.46	2.02	7.60
885	1.73	8.65	1.96	8.80	2.08	9.36	1.73	7.75
919	2.09	11.26	2.00	11.14	2.06	11.48	2.09	11.61
926	1.85	8.47	1.98	9.12	2.06	9.47	1.85	8.50
958	1.76	7.09	1.86	6.85	1.94	7.13	1.76	6.47
964	1.99	5.88	1.88	6.50	1.94	6.67	1.99	6.85
980	1.84	7.93	1.94	8.21	1.94	8.22	1.84	7.80
991	1.93	8.81	1.96	9.53	1.93	9.40	1.93	9.38

Résumé

La conscience est un concept difficile à définir et un débat subsiste dans la littérature scientifique concernant ses corrélats neuronaux (Seth & Bayne, 2022). Dans le domaine des états de conscience altérée, les études s'accordent généralement sur l'importance du réseau du mode par défaut (DMN) et du réseau frontopariétal, ainsi que l'activation du mésencéphale, pont supérieur, thalamus et hypothalamus (Blumenfeld, 2016) dans la récupération de la conscience après une période de coma (Bruno et al., 2011). Les expériences intérieures sont diverses et associées à différents types d'activités cérébrales. En particulier, le discours interne est associé à l'activation des régions frontales inférieures, des régions temporales postérieures et des régions pariétales (Alderson-Day & Fernyhough, 2015).

Nous avons visé à explorer les réseaux neuronaux en lien avec plusieurs caractéristiques des expériences intérieures : leur orientation (interne vs externe) et leur forme (discours interne vs imagerie visuelle). Nous avons également souhaité déterminer si les participants présentaient un type dominant d'expériences intérieures en tenant compte de l'âge. Nous avons acquis des images au repos par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et par tomographie par émission de positons (TEP) chez 36 participants sains (14 femmes, âge moyen de 49.42 ans) et avons collecté des réponses à des questions évaluant les pensées pendant les scans sur une échelle de 0 à 10.

Les résultats ont montré une corrélation négative significative entre l'âge et le discours interne. Les participants ne présentaient pas de type dominant d'expériences intérieures, la plupart d'entre eux ayant expérimenté à la fois le discours interne et l'imagerie visuelle, tout comme des pensées orientées vers l'intérieur et l'extérieur. Les analyses IRMf n'ont montré qu'une corrélation négative significative entre les pensées orientées vers l'extérieur et l'activité du réseau fronto-pariétal droit. Les analyses TEP ont mis en évidence une diminution du métabolisme du DMN et du cortex visuel primaire lorsque les participants étaient engagés dans des pensées orientées vers l'extérieur. Ni l'IRMf, ni la TEP n'a pu mettre en évidence de résultats significatifs pour l'imagerie visuelle ou les pensées orientées vers l'intérieur.

L'impact de potentiels biais méthodologiques est discuté. De plus, l'âge semble induire une augmentation du métabolisme du DMN et du cortex visuel primaire, mais les mécanismes sous-jacents doivent encore être investigués. L'étude des expériences intérieures en lien avec les ECAs ouvre des perspectives pour le développement des interfaces cerveau-ordinateur, offrant ainsi des opportunités pour améliorer la communication chez ces patients.