

Aix-Marseille Université

Ecole doctorale 62 : Sciences de la vie et de la santé

Institut de Recherche Biomédicale des Armées

Laboratoire de Neurosciences Sensorielles et Cognitives UMR7260

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur en Neurosciences

Caractérisation des processus créatifs pertinents pour
l'élaboration d'une rééducation holistique chez des
patients traumatisés crâniens

Apport de l'imagerie cérébrale

DESHAYES Claire

15/10/2020

Composition du Jury de thèse :

Rapporteur : Todd Lubart, *Professeur, Laboratoire de Psychologie et d'Ergonomie Appliquées*

Rapporteuse : Claire Vallat-Azouvi, *Maître de conférences, Laboratoire de Psychopathologie et Neuropsychologie*

Examinatrice : Nathalie Bonnardel, *Professeur, Centre de Recherche en Psychologie de la Connaissance, du Langage et de l'Emotion*

Examineur : François-Benoît Vialatte, *Chercheur associé Unité de neurophysiologie du stress, Institut de Recherche Biomédical des Armées*

Directrice de thèse : Béatrice Alescio-Lautier, *Directrice de recherche, Laboratoire de Neurosciences Sensorielles et Cognitives*

Co-directrice de thèse : Caroline Chambon, *Maître de conférences, Laboratoire de Neurosciences Sensorielles et Cognitives*

RESUME

Stenberg et Lubart définissent en 1996 la créativité comme la capacité à produire un travail nouveau et approprié à la tâche. Dans des pathologies comme le Traumatisme Crânien (TC) la capacité à faire face et à être innovant est primordiale pour une récupération optimale. Actuellement la réinsertion professionnelle des patients TC n'est pas idéale, seulement la moitié d'entre eux retrouve une activité professionnelle dans les années qui suivent l'accident. Certaines rééducations dites holistiques dispensent une prise en charge globale de l'individu en s'appuyant sur des facteurs cognitifs, psychologiques, émotionnels et environnementaux. D'après Lubart et al. (2003), le point commun entre ces facteurs serait le potentiel créatif.

Ceci met en lumière l'importance d'une meilleure caractérisation des processus créatifs pour améliorer la rééducation holistique chez les patients TC. La créativité est sous-tendue par de multiples facteurs qui interagissent entre eux or, elle est souvent étudiée à partir d'un seul facteur. C'est pourquoi dans une première étude, nous avons adopté une vision plus large de l'individu, en différenciant le niveau de créativité de 45 adultes sains sur la base d'un modèle de fonctionnement cognitif construit grâce à la modélisation d'équation structurelle (SEM-PLS). Ce modèle suppose l'influence de la mémoire de travail et de la pensée analytique sur la créativité. L'étude en IRMf de l'activité cérébrale de repos de ces sujets a révélé que les personnes très créatives ont une connectivité fonctionnelle augmentée dans le réseau attentionnel (AN) et le réseau du mode par défaut (DMN). Ces résultats, en accord avec les théories cognitives de la créativité nous ont conduit à l'appréhender et à la stimuler grâce à une approche holistique plus basée sur un fonctionnement cognitif que sur des fonctions cognitives stimulées de façon indépendante.

Dans une deuxième étude, nous avons construit sur la base de 83 sujets adultes sains un modèle cognitif (SEM-PLS) stipulant l'influence de l'inhibition, de la flexibilité et du raisonnement sur la pensée innovante qui est nécessaire à la créativité. Ce modèle nous a permis d'évaluer l'impact d'un entraînement en résolution de problèmes créatifs sur le fonctionnement cognitif et cérébral de 16 sujets. Un deuxième groupe de 15 sujets entraînés avec des mots croisés nous a permis d'évaluer la spécificité des effets de l'entraînement et enfin un troisième groupe sans entraînement de 52 sujets nous a servi de contrôle. Les résultats ont montré que, pour le groupe contrôle et celui entraîné avec les mots croisés, la pensée innovante est influencée par le raisonnement, alors que pour le groupe entraîné en résolution de problèmes, elle est influencée par la flexibilité. Cette modification s'accompagne d'une augmentation de la connectivité cérébrale de repos dans l'AN et le réseau visuel (VN). Ces résultats démontrent qu'un entraînement cognitif basé sur la résolution de problème favorise la pensée innovante en changeant la façon dont le sujet recrute les processus cognitifs nécessaires à la résolution du problème. Ce changement est sous-tendu par des modifications de la connectivité fonctionnelle de réseaux de repos.

Ces résultats positifs nous ont conduit dans une dernière étape à élaborer et évaluer un entraînement holistique basé sur la créativité à destination de patients TC. L'évaluation de cet entraînement chez 3 TC a montré une amélioration cognitive globale accompagnée par des changements structuraux évalués par l'imagerie en tenseur de diffusion.

L'ensemble de ces résultats, souligne que la créativité est une fonction à développer dans la prise en charge des patients car elle permet une meilleure récupération cognitive et peut ainsi favoriser leur réinsertion socio- professionnelle. De plus, son étude doit impérativement se faire de façon plus holistique afin d'intégrer les multiples facteurs qui la sous-tendent.

ABSTRACT

Stenberg and Lubart defined creativity in 1996 as the ability to produce work that is new and appropriate to the task. In pathologies such as traumatic brain injury (TBI), the ability to cope and be innovative is essential for successful recovery. Currently, vocational reintegration of TBI patients is not ideal since only half of them return to professional activity in the years following the accident. Some so-called holistic rehabilitation approaches provide comprehensive care for the individual and are based on cognitive, psychological, emotional, and environmental factors. According to the model of Lubart and al. (2003), the common point between these factors is the creative potential.

This highlights the importance of a better characterization of creative processes to improve holistic rehabilitation in TBI patients. Creativity is underpinned by multiple factors that interact with each other and is often studied from a single factor. Therefore, in a first study, we took a more comprehensive view of the individual, differentiating the level of creativity of 45 healthy adults based on a model of cognitive functioning constructed through structural equation modelling (PLS- SEM). This model assumes the influence of working memory and analytical thinking on creativity. The fMRI study of the resting state activity of these subjects revealed that highly creative individuals have increased functional connectivity in the Attentional Network (AN) and Default Mode Network (DMN). These results, in line with the cognitive theories of creativity, have led us to assess and stimulate it using a comprehensive approach based more on cognitive functioning than on independently stimulated cognitive functions.

In a second study, we constructed a cognitive model (SEM-PLS) based on 83 healthy adults, assuming the influence of inhibition, flexibility and reasoning on the innovative thinking that is necessary for creativity. This model allowed us to evaluate the impact of creative problem-solving training on the cognitive and cerebral functioning of 16 subjects. A second group of 15 subjects trained with crossword puzzles allowed us to evaluate the specificity of the effects of training and finally a third group without training of 52 subjects served as a control. The results showed that, for the control group and the crossword puzzle-trained group, innovative thinking is influenced by reasoning, while for the problem-solving group it is influenced by flexibility. This change is accompanied by an increase in resting state functional connectivity in the AN and visual network (VN). These results show that cognitive training based on problem solving promotes innovative thinking by changing the way the subject recruits the cognitive processes needed to solve the problem. This change is underpinned by changes in the functional connectivity of resting state networks.

These positive results led us in a final step to develop and evaluate a holistic creativity-based training for TBI patients. Assessment of this training in 3 TBI patients showed an overall cognitive improvement accompanied by structural changes assessed by diffusion tensor imaging.

All these results underline that creativity is a function to be developed in the rehabilitation of patients because it allows a better cognitive recovery and can thus promote their social and professional reintegration. Moreover, it is imperative that the study be carried out in a more holistic manner in order to integrate the multiple factors that underlie creativity.

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais remercier le laboratoire pour m'avoir accueilli, et tout particulièrement Béatrice, ma directrice, pour avoir cru en moi et m'avoir donné l'opportunité de réaliser ma thèse dans cette équipe. Je remercie également Caroline ma co-directrice qui a su rester disponible malgré ses deux grossesses, à quand le troisième ?? 😊 Je remercie également Véronique pour sa disponibilité et son aide apportée lors des analyses, ainsi que Marie-Hélène Ferrer notre collaboratrice dans ce projet, pour sa bienveillance.

Je remercie tout particulièrement mon jury de thèse, Todd Lubart et Claire Vallat-Azouvi, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. De même je remercie Nathalie Bonnardel et François-Benoît Vialatte pour avoir accepté de faire partie du jury. Je leur suis reconnaissante d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer mon travail.

J'ai eu la chance durant cette thèse de collaborer sur deux projets chez les personnes âgées et pour cela je tiens à remercier Jean-Marc et Edith ainsi qu'Isabelle Reigner et Kim Gauthier, pour ces expériences très enrichissantes.

Je tiens également à remercier nos deux secrétaires de choc, Nadia Tir et Nadia Melili, pour leur travail en coulisse, et leur soutien technique tout au long de ces trois années !

Je remercie le service informatique du laboratoire, et particulièrement Arnaud Weill pour son aide ainsi que Loïc Bonnier pour m'avoir aidé plus d'une fois dans les analyses ! Je remercie également Jean-Luc Anton, Bruno Nazarian et Julien Sein du centre CERIMED de La Timone qui ont permis la réalisation de nos recherches.

Un grand merci à mes amis pour m'avoir supporté !! Et notamment les L5 pour nos petites réunions papotages qui me permettaient, pour un temps, d'oublier le stress de la thèse. Une mention toute spéciale pour « petit canari », cette fin de thèse aura été mouvementée, mais nous

y sommes arrivés !! La thèse et le master auraient été bien terne sans toutes ces anecdotes (toujours garder une pince à épiler sur soi xD) mais surtout ton sens de l'orientation, qui je crois restera dans les mémoires de tous !! Je tiens également à remercier Elodie et Jean-Luc pour leur soutien, les pauses du midi et les week-ends à la campagne qui m'ont apporté un véritable bol d'air frais ! Je remercie Estelle pour ses conseils bien avisés, l'instauration des jeux du midi, son soutien sans faille et puis parce que ça va « laller » (maintenant qu'elle est terminée je t'autorise à la lire 😊). Une pensée pour Mariama, sa joie de vivre communicative et sa bienveillance ! Merci à Philippe pour les petits déj' canadien avec de supers pancakes au sirop d'érable ! Bien sûr, je remercie également David, Jacko, Emna, Falco, et tant d'autres qui participent à la bonne humeur quotidienne au sein du laboratoire et faisant de ces 4 années de beaux souvenirs, principalement lors des pauses de midi qui nous permettent de décompresser avant de se remettre au travail sur des chapeaux de roues !

Petite mention spéciale pour mon bureau que j'ai partagé avec les deux meilleurs doctorants ! A ma binôme Anaïs, que je remercie pour son aide dans les manips mais surtout sa bonne humeur et son optimisme à toute épreuve ! A nos plans d'avenir et notre future entreprise qui va être au TOP !! Et bien sûr Léo l'un des rares représentants de la gente masculine au premier, qui pour s'intégrer et nous supporter, a bien su faire ressortir son petit côté féminin 😊 !

Je remercie le Covid-19 et surtout le confinement mis en place qui m'a permis de booster mon écriture, ainsi que mon chat, Osiris, qui m'a imposé un rythme de travail drastique pendant cette période ! Merci également à Laurent Pezard pour avoir ponctué nos journées au laboratoire à cette reprise post-apocalyptique. Je remercie également Jonathan, « le gars de la guitoune » pour m'avoir apporté les nutriments et la caféine nécessaires à l'aboutissement de cette thèse.

Pour finir, je voudrais remercier ma maman qui a fait de moi la femme que je suis devenue, qui me soutient et m'encourage dans chaque projet que j'entreprends, mais surtout pour avoir accepté malgré elle d'être mon mur des lamentations et d'avoir joué ce rôle à la perfection ! Je la remercie également pour les multiples relectures.

Table des matières

Introduction générale	1
Partie 1 :Qu'est ce que la créativité et comment la stimuler	5
Chapitre 1 :Revue de littérature sur les modèles de la créativité	5
I. La créativité à travers le modèle de Rhodes : les 4P	6
a) Modèle de Rhodes : les 4P.....	6
b) Approche par la <i>Personne</i>	7
i) La cognition.....	7
ii) L'intelligence	10
iii) Les traits de personnalité	10
iv) Les émotions	11
v) La condition physique	13
c) Approche par les <i>Processus</i>	13
i) Le modèle de Wallas (1926)	13
ii) Les modèles de doubles voies	15
d) Approche par la <i>Physiologie</i>	16
i) IRM anatomique et créativité.....	17
ii) IRM fonctionnelle et créativité	19
e) Approche par les <i>Pressions</i>	22
i) Environnement socio-culturel	22
ii) Substances	26
f) Approche par le <i>Produit</i>	27
II. Les modèles d'interactions entre les différentes facettes de la créativité.....	30
a) Le modèle du cadre constructif de la créativité	30
b) Le modèle Multivarié.....	31
Chapitre 2 :Revue de littérature sur l'entraînement en créativité.....	35
I. Approche par la <i>Personne</i>	36
a) Entraînement cognitif.....	36
b) Entraînement par Biofeedback	39
II. Approche par les pressions	41
III. Approche par les processus	43
a) Entraînement en métacognition.....	43
b) Entraînement par perfectionnement	44

Chapitre 3 :Expérimentations.....	47
Etude 1 : Mise en parallèle d'un fonctionnement cognitif et d'un fonctionnement cérébral pour la mise en évidence des mécanismes sous-tendant la créativité.....	49
Etude 2 : Entraînement en résolution de problème	51
Partie 2 : Application des processus créatifs pour la prise en charge du Traumatisme Crânien (TC).....	53
Chapitre 1 :Revue de littérature sur le TC	53
I. Les patients TC.....	55
a) Incidence, épidémiologie et classification.....	55
b) Séquelles cérébrales.....	56
c) Séquelles cognitives	56
i) Le syndrome dysexécutif.....	56
ii) Le syndrome post-commotionnel.....	57
iii) Evolution de la pathologie	58
II. Rééducation.....	60
a) Bilan d'évaluation.....	60
i) Tests de routine	60
ii) Tests développés au laboratoire.....	62
iii) Les images ambiguës.....	63
b) Rééducations	64
i) Rééducation Standard.....	64
ii) Rééducation holistique.....	65
Chapitre 2 :Revue de littérature sur la créativité chez les TC	69
Chapitre 3 :Expérimentations.....	73
Etude 3 : Rééducation holistique de patients traumatisés crâniens	75
Partie 3 : Synthèse et discussion générale.....	77
Synthèse.....	77
Discussion.....	83
I. Quels sont les réseaux de l'activité cérébrale de repos les plus en lien avec la créativité ?	84
II. Notre apport aux modèles de créativité.....	87
III. Niche créative et rééducation holistique centrée sur la créativité	90
IV. Critique des mesures de diffusion	95
V. Conclusion générale et perspectives	97

Annexe 1 : Tests mnésiques	102
Annexe 2 : Tests attentionnels	105
Annexe 3 : Tests exécutifs	107
Annexe 4 : Tests développés au laboratoire et images ambiguës	114
Annexe 5 : Groupes Contrôles.....	119
Annexe 6 : Résolution de problèmes.....	122
Bibliographie.....	126

INTRODUCTION GENERALE

La créativité est un élément essentiel dans la vie d'un chercheur. Nous sommes en effet voués à explorer, creuser et dévoiler tous les chemins qui nous permettraient d'apporter les réponses aux questions que nous nous posons et résoudre des problèmes nouveaux. Cela passe souvent par une idée ou un comportement nouveau ainsi que par l'utilisation de nouvelles procédures. Sans créativité nous ne pourrions que reproduire inlassablement ce qui a déjà été fait. Je trouve cette thématique très intéressante à étudier du fait de sa complexité mais aussi de ses enjeux.

Plus largement, cette capacité à être créatif a aidé les civilisations à évoluer considérablement, leur permettant de sortir des sentiers battus par l'innovation. La créativité fait partie de notre quotidien et participe à améliorer et émerveiller notre vie. Elle n'est pourtant réellement étudiée que depuis les années 1950. Grâce à elle, lors de nouvelles situations, nous sommes capables de trouver une solution originale et innovante. Il faut savoir que le concept même de créativité dans la vie quotidienne n'a émergé que dans les années 40. Avant cela, le terme utilisé était : sérendipité. Ce terme a été proposé par Horace Walpole dans une lettre de 1754 adressée à l'un de ses amis (Walpole, 1840). L'idée lui vient d'un livre « Les trois princes de Serendip » qu'il avait lu étant enfant. Il définit alors la sérendipité comme étant la capacité de faire le lien entre des événements a priori sans rapport, c'est un élément essentiel et précurseur de la créativité (Cunha et al., 2010). Dans le domaine de la recherche scientifique, de nombreuses avancées sont attribuées à la sérendipité, l'une des plus connues est celle d'Alexander Flemming qui, en retrouvant une boîte de Petri oubliée, observa qu'il y avait eu développement d'un champignon et qu'aucune bactérie ne s'était développée. C'est alors qu'il fit le lien, le champignon avait empêché la prolifération des bactéries en culture, et ce fut la découverte de la pénicilline.

Dans le cadre de ma thèse, je ne traiterai pas de la créativité de génie ou artistique mais de la créativité au quotidien, celle qui nous permet de faire face à de nouvelles situations et de résoudre

des problèmes, des plus simples (comment accommoder les aliments dont je dispose dans mon réfrigérateur) aux plus complexes (trouver le protocole idéal pour limiter la propagation d'un virus tout en maintenant l'économie du pays). Comme tout concept, il en existe plusieurs définitions qui reflètent l'évolution de sa représentation collective. La créativité a tout d'abord été définie comme la capacité de produire quelque chose d'original, puis en 1962, Mednick a introduit la notion d'utilité. En effet, pour lui, la créativité n'a de sens que si elle est utile au but que l'on s'est fixé. De là, en 1996 Stenberg & Lubart énoncent une définition très largement adoptée : « la créativité c'est lorsque l'on produit quelque chose qui est à la fois original et adapté à une tâche ». Cette capacité s'appuie sur les 4 aspects suivants : *la fluence*, c'est-à-dire le nombre de réponses données par le participant pour une tâche donnée ; *la flexibilité*, qui est le nombre de catégories sémantiques explorées par le participant au travers de l'ensemble de ses réponses ; *l'originalité* de chacune des réponses par rapport à l'ensemble des réponses données par tous les participants testés ; et enfin *l'élaboration* de chacune des réponses du sujet, qui révèle l'aboutissement de l'idée abordée, notamment par les détails ajoutés qui ne sont pas nécessaires à la compréhension de l'idée de base. Les théories sur les mécanismes cognitifs à l'origine de la créativité mettent en évidence l'implication de processus sémantique, attentionnel, d'inhibition, de flexibilité mentale et de persistance (De Dreu et al., 2008; Martindale, 2007; Mednick, 1962; Mendelsohn, 1976). Au niveau cérébral, de nombreuses études montre un lien entre la créativité et le volume cérébral de certaines aires (Arkin et al., 2019; Jauk et al., 2015; Jung et al., 2009; Shi et al., 2017; Takeuchi et al., 2010a) ainsi qu'une modification de la connectivité fonctionnelle au repos des sujets présentant une créativité plus élevée (Beaty et al., 2014). Mais notre compréhension de ces phénomènes reste encore assez restreinte.

Pour des individus présentant un handicap inné ou acquis, qu'il soit léger ou grave, certaines situations paraissant anodines et routinières peuvent s'avérer très complexes voire insurmontables. La capacité à faire face est alors importante afin qu'ils puissent s'adapter aux contraintes. Il est donc

nécessaire de fournir à ces personnes des ressources supplémentaires pour solutionner ces situations, dans ce cadre la créativité pourrait leur être salvatrice. D'où l'idée de les rendre plus créatifs par un entraînement ou une rééducation appropriée favorisant leur réinsertion socio-professionnelle. En ce sens, la créativité peut être vue comme un outil thérapeutique majeur et son insertion dans les programmes de rééducation comme un véritable enjeu de santé publique. Cependant, malgré les avancées de la recherche scientifique dans ce domaine, les mécanismes cognitifs et cérébraux qui sous-tendent la créativité restent encore assez méconnus. Nous savons que certains processus cognitifs, comme par exemple la mémoire de travail, sont importants pour l'expression de la créativité, tandis que d'autres sont limitants, comme par exemple la pensée analytique. Nous ignorons jusqu'à quel point ces derniers impactent négativement la créativité et dans quelle mesure ils interagissent avec les processus qui la favorisent. Or, la créativité étant au cœur de la capacité d'adaptation des patients, comprendre ces interactions est un enjeu majeur. Ainsi, identifier les leviers applicables à une rééducation basée sur la créativité pourrait améliorer le quotidien de patients en situation de handicap. Dans le cadre rééducatif, les approches dites holistiques semblent plus adaptées et favorisent une meilleure récupération fonctionnelle des patients. Ces rééducations s'appuient sur plusieurs facteurs, parmi lesquels les facteurs cognitifs, émotionnels, psychologiques et environnementaux. D'après le modèle de Lubart et collaborateurs (2003), le point commun entre tous les facteurs qui englobent la prise en charge holistique serait le potentiel créatif. C'est pour cette raison que nous pensons qu'il est primordial de travailler ce potentiel créatif dans le cadre d'une rééducation holistique car cela pourrait permettre un transfert des bénéfices dans la vie quotidienne des patients et ainsi favoriser une réinsertion, sociale et professionnelle.

L'ensemble de ce questionnement sera traité en trois parties. Une première partie, abordera la créativité, ce qui la définit et comment nous pouvons l'améliorer. J'introduirai ici mes deux premières études, dont la première traite d'une approche cognitive globale qui permettrait de

mieux comprendre les interactions entre les différents facteurs cognitifs et la créativité, et la deuxième étudie l'effet d'un entraînement en résolution de problème sur les performances créatives des participants. Ensuite dans une seconde partie nous verrons l'application possible des processus créatifs dans le cadre de la rééducation de pathologies cérébrales. J'exposerai dans un premier temps les caractéristiques de la population des Traumatisés Crâniens (TC) et pourquoi j'ai choisi cette population d'intérêt. Puis, dans un second temps, nous verrons que malgré une littérature bien étayée sur de multiples pathologies et leur impact sur la créativité, celle sur les TC reste très pauvre. Dans ce contexte, j'aborderai ma troisième étude, qui traite de l'apport de la créativité dans le cadre d'un entraînement holistique chez des patients TC chronique. Enfin, je clôturerai ce travail par une dernière partie de synthèse et discussion générale de l'ensemble de mes travaux expérimentaux.

Partie 1 : Qu'est-ce que la créativité et comment la stimuler

Chapitre 1 : Revue de littérature sur les modèles d'étude de la créativité

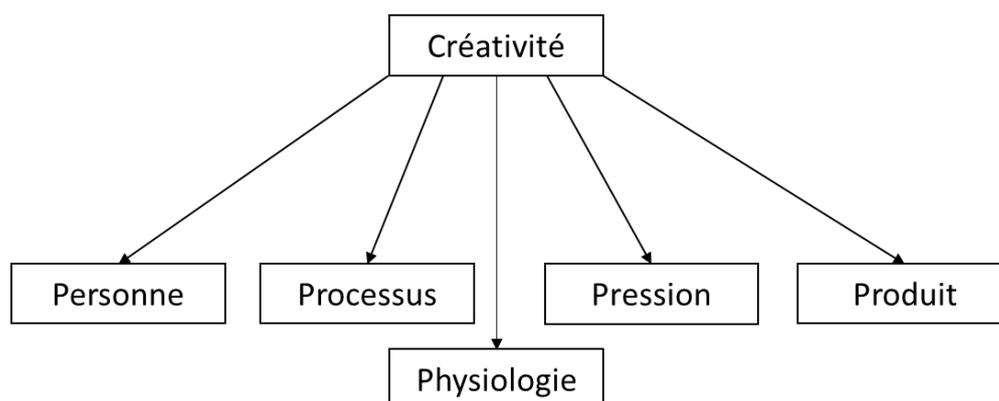
Je tiens à rappeler ici que je me focalise sur la créativité au quotidien telle que définie par Stenberg & Lubart (1996), c'est-à-dire comme étant la capacité à produire quelque chose qui est à la fois original et adapté à une tâche. Dans ce premier chapitre nous allons aborder comment la créativité est étudiée dans la littérature, quels sont les différents mécanismes considérés comme étant à son origine, quels sont les éléments cognitifs et cérébraux qui la sous-tendent mais aussi quels moyens peuvent être utilisés pour la potentialiser. Ces différents points seront abordés à travers la description de plusieurs modèles théoriques qui proposent chacun une vision de ce qu'est la créativité et qui font aujourd'hui référence dans le domaine.

I. La créativité à travers le modèle de Rhodes : les 4P

a) Modèle de Rhodes : les 4P

En considérant que la créativité possède de multiples facettes, Rhodes en 1961 propose le modèle des 4Ps, qui caractérise quatre approches de la créativité pour étudier ces différentes facettes. Ce modèle regroupe l'approche par la *Personne*, les *Pressions*, le *Processus*, et le *Produit* (Figure 1). Plus tard, ce modèle a été complété par l'approche par la *Physiologie* (Abraham, 2018).

Figure 1 : Modèle des 5P (adapté de Rhodes 1961)



Nous allons aborder l'ensemble des théories et modèles qui ont été proposés pour caractériser et comprendre les facettes du processus créatif en nous appuyant sur le découpage proposé par le modèle de Rhodes. Nous commencerons par l'approche par la « *Personne* » suivie de celle par les « *Processus* », ensuite, bien qu'elle soit la dernière pièce ajoutée au modèle, j'aborderai l'approche

« *Physiologique* » car elle est pour moi intimement liée aux deux précédentes. Nous verrons ensuite l'approche par les « *Pressions* » et pour finir l'approche par le « *Produit* » qui diffère des précédentes car si elle permet de mesurer les productions créatives et donc de caractériser la créativité, elle ne permet pas d'identifier des facteurs impactant la créativité.

b) Approche par la *Personne*

L'approche par la « *Personne* » est l'étude des facteurs qui permettent de caractériser un individu, à savoir : ses capacités cognitives, ses traits de personnalité, ses émotions et son intellect. Dans les sous-sections suivantes, je décrirai les liens proposés dans la littérature entre ces facteurs et la créativité.

i) *La cognition*

La créativité étant une fonction complexe, depuis les années 50, plusieurs théories ont été énoncées sur les différents mécanismes cognitifs qui la sous-tendent. Actuellement, aucune d'entre elles ne fait un réel consensus et toutes ces théories restent totalement ou partiellement vraies. Dans cette section, je vais donc détailler chacune d'entre elles.

La première théorie cognitive fut énoncée par Mednick en 1962. Pour cet auteur, la créativité est sous-tendue par une organisation sémantique et associative différente favorisant l'accès à des concepts distants. Pour chaque concept, nous avons un sous-ensemble de concepts/mots rangés dans un certain ordre qui peut varier d'une personne à l'autre. De plus, le lien sémantique entre les concepts et leur sous-ensemble est plus fort qu'entre les différents concepts car ce sont des liens proximaux. Par exemple, si on vous dit le mot « vache », les mots qui peuvent vous venir à l'esprit sont : « veau, bœuf, lait... ». Ils font partie du même sous-ensemble de concepts. En revanche, à partir du mot « vache » il sera plus difficile d'arriver directement au mot « hélicoptère » par exemple, car ils n'appartiennent pas au même concept, ce sont des liens distants. Selon la théorie de Mednick, les personnes plus créatives ont des liens distants plus forts alors que les liens proximaux sont moins forts ce qui leur permet de passer plus aisément d'un concept à l'autre et

donc de trouver des idées originales. Ainsi, pour une personne très créative, le mot « vache » évoque moins spontanément les mots de son sous-ensemble (lait, veau, bœuf ...), du fait de liens proximaux amoindris, alors que des mots appartenant à d'autres concepts comme « hélicoptère » viendront un peu plus facilement à l'esprit car les liens distants sont renforcés. De façon commune les concepts sont représentés horizontalement les uns à côté des autres et leurs sous concepts sont représentés dessous. Ainsi, les personnes peu créatives vont favoriser une exploration verticale, alors que les personnes très créatives favoriseront une exploration horizontale. C'est pourquoi cette théorie s'appelle la théorie des hiérarchies associatives plates.

La deuxième théorie fut énoncée par Mendelsohn en 1976, sur la base des travaux de Mednick. Selon Mendelsohn, le défocus attentionnel est le mécanisme le plus important pour la créativité. Les personnes à forte créativité ont la capacité d'utiliser des indices dans leur environnement proche et de maintenir un flot d'informations en parallèle avec la capacité de pouvoir aisément passer de l'un à l'autre en produisant des liens nouveaux entre les différentes informations. Cette théorie est renforcée par Cramond en 1995, qui met en évidence que des patients souffrant de troubles du déficit attentionnel et d'hyperactivité ont une créativité élevée. Cette pathologie se caractérise par un fort défocus attentionnel ce qui selon Mendelsohn est un élément clef de la créativité.

En 2007, Martindale proposa une troisième théorie selon laquelle la créativité reposerait sur des mécanismes de désinhibition cognitive. En se basant sur les travaux de Ghiselin (1985) et de Lombroso (1895) qui caractérisent la créativité par une désinhibition cognitive et comportementale, Martindale décrit plusieurs états de conscience qui constituent le continuum conceptuel-primordial. D'un côté de ce continuum se trouve un état de conscience dirigée, contrôlée et rationnelle alors qu'à l'autre bout se trouve un état de conscience non-dirigée comme lors des rêves. Entre ces deux états se trouve un continuum d'états de conscience avec notamment un état intermédiaire de désinhibition comme dans les rêves éveillés. Cet état permettrait de mettre en lien des informations

a priori sans relation (Baird et al., 2012; Gable et al., 2019; Yamaoka and Yukawa, 2019; Zhong et al., 2008) mais aussi d'être plus flexible, plus ouvert d'esprit, promouvant ainsi la créativité. Plusieurs études ont également fait le lien entre la mémoire de travail et la créativité. C'est notamment le cas des travaux de McVay et collaborateurs (2009) qui ont démontré que le taux d'errance de la pensée (en anglais « mind wandering ») variait en fonction de la capacité en mémoire de travail sachant que l'errance de la pensée est propice à la créativité (Fox and Beaty, 2019; Martindale, 2007).

Il est intéressant de remarquer ici que ces trois théories mettent en avant le rôle important de l'inhibition, la mise à jour et la flexibilité dans la créativité, trois mécanismes cognitifs présentés comme inhérents à la mémoire de travail selon le modèle de Miyake et collaborateurs (2000). Ces théories sont indéniablement complémentaires mais si elles montrent que la créativité peut découler de la synergie de ces trois mécanismes cognitifs, mettant ainsi en avant la mémoire de travail, il serait restrictif de ne pas s'intéresser à d'autres fonctions cognitives étant donnée la complexité de la créativité. A titre d'exemple, de nombreuses études ont mis en évidence un lien entre imagerie mentale et créativité (pour revue voir Kozhevnikov et al., 2013; LeBoutillier and Marks, 2003). De même, la créativité repose sur différentes formes de mémoire, non seulement la mémoire à court terme est essentielle via la mémoire de travail, mais la mémoire à long terme l'est tout autant, notamment à travers la mémoire épisodique. Grâce à cette capacité nous pouvons nous remémorer des expériences vécues et en tirer avantage pour être plus créatifs (Madore et al., 2015). (Madore et al., 2015). Benedek et Neubauer (2013) avancent que les personnes créatives ne sont pas tant différentes dans la façon dont leur mémoire est organisée mais plutôt dans la façon dont elles y accèdent, ce qui met en avant les processus de rappel. Storm et collaborateurs (2011) mettent en avant l'oubli qui peut survenir à la suite du rappel mnésique. Cet oubli, provoqué par des processus inhibiteurs, jouerait un rôle crucial dans la résolution de problèmes créatifs. En effet, la difficulté dans les tâches créatives réside dans l'influence persistante d'idées anciennes qui

entraîne une certaine fixation mentale, empêchant toute production d'idées nouvelles et créatives. Ainsi pour ces auteurs, il ne suffit pas d'avoir des idées appropriées pour penser de façon créative, encore faut-il mettre de côté ou oublier les idées inappropriées. Ces considérations renforcent le rôle joué par l'inhibition qui est incontestablement un processus nécessaire à l'émergence de la créativité (Gupta et al., 2012; Radel et al., 2015).

ii) L'intelligence

L'intelligence est définie dans le dictionnaire Larousse comme étant « l'ensemble des fonctions mentales ayant pour objet la connaissance conceptuelle et rationnelle, permettant à l'être humain de s'adapter à une situation et de choisir des moyens d'action en fonction des circonstances ». Les liens entre créativité et intelligence ne sont pas encore clairement établis. Certaines études montrent que l'intelligence peut prédire les performances créatives (Miller et Tal, 2007), tandis que d'autres les considèrent comme étant deux fonctions à distinguer qui n'ont pas de lien entre elles (Neubauer et Martskvishvili, 2018). De nombreuses études ont montré que la mémoire de travail était un élément nécessaire à l'intelligence (Pour revue voir Kane & Engle, 2002) et comme nous l'avons vu, la mémoire de travail est un élément essentiel à la créativité. L'intelligence et la créativité sont donc deux capacités, sous-tendues par un même substrat cognitif (Benedek et al., 2014b; Kandler et al., 2016). Il semble alors logique que ces deux capacités soient liées entre elles. Par ailleurs, au vu des définitions de l'intelligence et de la créativité, nous comprenons bien que l'intelligence est un prérequis à la créativité, mais qu'elle n'est pas suffisante à elle seule pour aboutir à la créativité, ce qui peut expliquer les dissimilarités entre les études.

iii) Les traits de personnalité

Les recherches en créativité se sont rapidement intéressées à l'influence ou en tout cas au lien qui pourrait exister entre les traits de personnalité et la créativité. En 1926, Cox propose que certains traits de personnalité pourraient avoir un rôle causal dans le développement de la créativité. La plupart des études utilisent les questionnaires du Big 5 Inventory (John et al., 1991) et du NEO Five

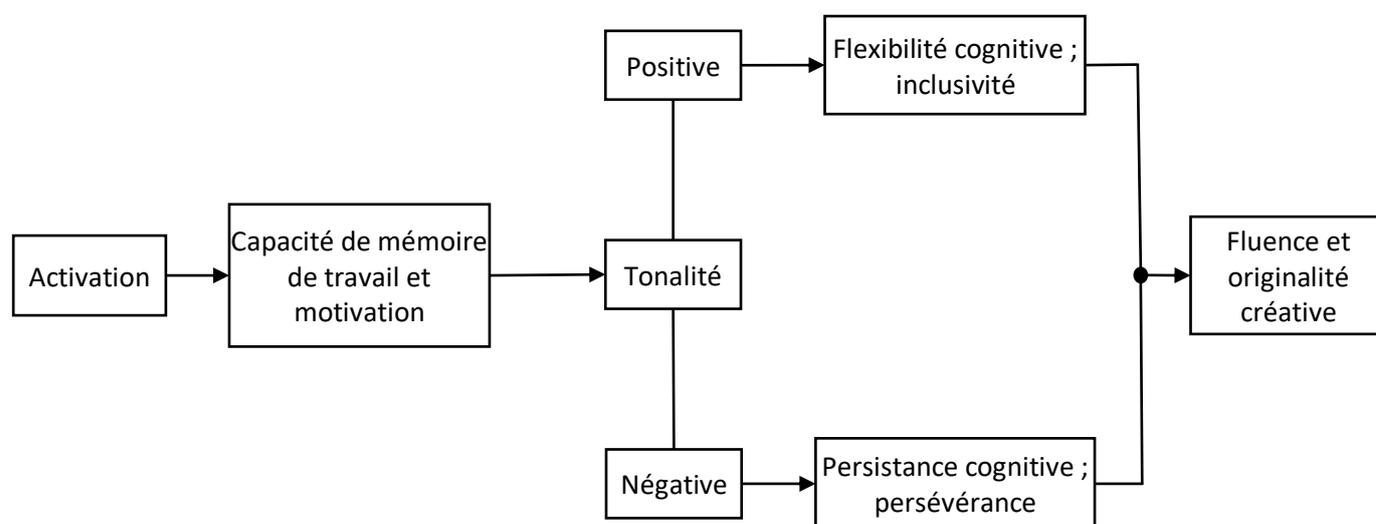
Factor Inventory (Costa et al., 1995) qui évaluent les cinq traits de personnalité suivants : l'extraversion, la conscience professionnelle, le névrotisme, l'agréabilité et l'ouverture aux nouvelles expériences. Ces études montrent que la créativité est corrélée avec l'ouverture à de nouvelles expériences et l'extraversion (Drevdahl and Cattell, 1958; Feist, 2019; Goćłowska et al., 2018; Kandler et al., 2016; Mackinnon, 1962; Mumford and Gustafson, 1988; Pérez-Fuentes et al., 2019) montrant ainsi un lien entre certains traits de personnalité et le développement de la pensée créative, ce qui irait dans le sens d'une prédisposition naturelle de certaines personnes à être créatives. Cette dernière remarque est appuyée par les travaux de Ren et collaborateurs (2019) qui montrent que des mécanismes génétiques pourraient affecter le potentiel créatif.

iv) Les émotions

Les émotions joueraient également un rôle crucial dans la mise en œuvre des processus créatifs. C'est un lien largement connu chez les artistes, pour lesquels les états d'âmes peuvent modifier l'inspiration. En effet, le génie de nombreux artistes se révèle souvent à la suite de fortes émotions négatives (Hare, 1987). De nombreuses études ont montré l'implication de l'affect et notamment des émotions positives dans la créativité dans le cadre de la résolution de problème. Les émotions positives permettent d'augmenter les capacités d'organiser les idées de multiples façons et d'accéder à de nouvelles perspectives (Ashby and Isen, 1999). Fredrickson (1998) propose qu'elles puissent également élargir le champ attentionnel. Or, comme nous l'avons vu plus haut, l'attention joue un rôle important dans la créativité et plus le champ attentionnel est large, plus une personne pourra être créative (Ansburg & Hill, 2003). De Dreu et collaborateurs (2008) ont également souligné le rôle important des états émotionnels dans l'augmentation de la créativité dans le cadre de leur modèle dit « de double voie ». Dans un premier temps, ils ont construit ce modèle en se basant sur la littérature et les modèles cognitivistes de la pensée créative. Ainsi, il est constitué d'une voie de la flexibilité impliquée dans des mécanismes de génération d'idées originales, comme l'a décrit Mednick (1962), et d'une voie de la persistance qui permet une exploration focalisée et structurée de peu de catégories ou concepts cognitifs (Finke, 1996; Jonathan W Schooler et al., 1993; Simonton,

1999) et des processus de recherche incrémentielle (Boden, 1998). Dans un second temps, les auteurs ont démontré que sous l'influence des émotions, l'une de ces deux voies devenait prépondérante lors du processus créatif. Pour cela, ils se sont intéressés à l'impact de différents états émotionnels en étudiant à la fois leur nature (positive ou négative) et leur expression (active lorsque le sujet prend une part active à son expression comme dans la colère ou la joie, ou non active lorsque le sujet va être passif comme par exemple la tristesse ou la relaxation). Cette notion d'activation de l'émotion a été très peu étudiée en lien avec la créativité. Dans leur étude, les auteurs ont démontré que les émotions d'activation sont corrélées à la créativité alors que les émotions de désactivation, aussi bien positives que négatives ne le sont pas. De plus, ils ont également mis en évidence que les émotions d'activation négatives sont à l'origine de la voie de la persistance alors que celles positives sous-tendent la voie de la flexibilité (Figure 2).

Figure 2 : Modèle de double voie adapté de De Dreu et collaborateurs (2008)



Il est également intéressant de noter que la façon dont les émotions sont induites peut modifier leur puissance et donc avoir un impact sur les performances créatives. Baas et collaborateurs (2008) ont ainsi démontré que l'induction des émotions par l'imagerie mentale était plus efficace que les autres méthodes d'induction (notamment la visualisation d'un film triste ou d'une comédie) et permet de meilleures performances créatives.

v) *La condition physique*

L'impact positif de l'activité physique sur la cognition est bien connu (Carrasco-Poyatos et al., 2019). En effet, l'activité physique entraîne une libération de dopamine dans les ganglions de la base qui jouent un rôle dans la motivation et la récompense (Frith and Loprinzi, 2018). Cette structure est connectée, par la voie dopaminergique au cortex préfrontal, qui est lui-même impliqué dans de nombreuses fonctions exécutives, dont le contrôle cognitif, l'inhibition ou encore la planification. Par ailleurs, l'activité physique a un impact sur la croissance et le développement neuronal, notamment dans l'hippocampe, structure impliquée dans la mémoire qui est comme nous l'avons vu une fonction cognitive essentielle à la créativité (Pour revue voir Loprinzi et al., 2013). Cependant, Colzato et collaborateurs (2013) ont montré que l'activité physique a un effet favorable sur la créativité jusqu'à une certaine mesure. En effet, si l'activité physique est pratiquée à haut niveau, les mouvements sont effectués de façon automatique, entraînant la perte du bénéfice.

Ainsi l'approche par la personne permet d'identifier des facteurs propres à l'individu sur le plan cognitif, psychologique, émotionnel, et physique qui vont impacter la créativité du sujet. Ces facteurs peuvent être nécessaires aux processus créatifs que je vais décrire dans la section suivante.

c) *Approche par les Processus*

Dans cette section nous allons aborder les théories, concepts et modèles énonçant les grandes étapes qui sous-tendent la pensée créative. Ces modèles apportent une explication sur le « protocole » de pensée suivi pour aboutir à une idée créative.

i) *Le modèle de Wallas (1926)*

Le premier modèle de la pensée créative fut établi en 1926 par Wallas dans son livre *l'Art de la pensée* (en anglais « *Art of thought* ») (1926). Il est énoncé avant même que le mot créativité n'apparaisse ; en effet, à cette époque on utilisait plutôt les termes « idée heureuse » ou « idée chanceuse » pour faire références à ce qui deviendrait plus tard la créativité. Son modèle de la pensée créative permet d'expliquer les processus d'insight ou « Aha- moments », lorsque la solution

à un problème nous apparaît d'emblée, sans vraiment savoir comment. Pour développer ce modèle, Wallas se base sur les introspections de deux éminents scientifiques de l'époque : le physicien Hermann Helmholtz, et le mathématicien Henri Poincaré.

Le premier, Hermann Helmholtz donna un banquet pour son 70^{ème} anniversaire en 1891, pendant lequel il prononça un discours expliquant comment lui venaient ses nouvelles idées :

“Suite aux investigations du problème dans toutes les directions [...] les idées heureuses viennent de façon inattendue sans effort, comme une inspiration. En ce qui me concerne, elles n'apparaissent jamais lorsque mon esprit est fatigué, ou quand je suis à ma table de travail.”

(Adapté de Sadler-Smith, 2015)

A l'examen de ce discours, Wallas distingua 3 étapes de la pensée : 1. La préparation qui consiste en une exploration large du problème ; 2. L'incubation qui correspond à la période pendant laquelle il n'y a pas de réflexion consciente sur le problème et 3. L'illumination ou « insight » qui correspond à l'apparition de l'idée créative. Mais c'est grâce aux écrits de Poincaré que Wallas a pu compléter son modèle en identifiant une quatrième étape. En effet, en 1908, Henri Poincaré publie un ouvrage intitulé « *Science et Méthode* » dans lequel il y décrit lui aussi les étapes qui l'amènent à une nouvelle idée. A la différence de Helmholtz, il décrit une étape après l'illumination qui est l'étape de la vérification correspondant à un test après lequel seules certaines idées sont gardées. Ainsi le modèle de Wallas se compose de 4 étapes : la préparation, l'incubation, l'illumination et la vérification. Les étapes de préparation et de vérification suivent un processus conscient de pensées très logiques et mathématiques. La phase d'illumination quant à elle, est l'aboutissement conscient du train de pensées mené lors de la phase d'incubation. Cette dernière étape, à l'inverse des précédentes, est un processus inconscient. C'est l'étape la plus étudiée et, en fonction de ses caractéristiques, ses effets vont être soit bénéfiques soit délétères (Chu and MacGregor, 2011) sur les processus créatifs. Baird et collaborateurs (2012) ont par exemple montré qu'une période d'incubation pendant laquelle le sujet exécute une tâche demandant peu d'effort cognitif

permettait ensuite d'augmenter ses performances à la tâche créative, beaucoup plus que si le sujet effectuait une tâche à forte demande cognitive (impliquant la mémoire de travail par exemple) ou s'il ne faisait rien pendant la période d'incubation. De plus, dans une étude portant sur l'impact de l'errance de la pensée pendant la période d'incubation sur les capacités de créativité, Yamaoka et Yukawa (2019) ont montré que les sujets qui avaient le plus grand taux d'errance de la pensée augmentaient leur flexibilité lors de la tâche créative. Selon eux, cela montrerait que ces participants sont capables d'ouvrir leurs champs de perspectives et d'accéder à plus d'informations. Par ailleurs, Hao et collaborateurs (2015) ont mis en évidence que des sujets avaient de meilleurs résultats à une tâche de pensée divergente après un temps d'incubation. Mais également que cet effet était augmenté si une émotion positive versus négative était induite pendant le temps d'incubation. Donc, cette phase d'incubation s'inscrit dans la théorie de Martindale, selon laquelle un relâchement du contrôle cognitif serait propice à la créativité. A l'heure actuelle, les quatre étapes du modèle de pensée créative de Wallas restent une base pérenne pour expliquer les processus cognitifs liés à la pensée créative.

ii) Les modèles de doubles voies

Les modèles de doubles voies expliquent la cognition créative en se basant sur la distinction entre deux processus ou mécanismes.

Le premier modèle, le modèle « Geneplore », proposé en 1992 par Finke et collaborateurs, repose sur un mécanisme de génération et un autre d'exploration. La phase de génération consiste en la production d'idées et est fonction de la façon dont la tâche est réalisée, c'est-à-dire soit de façon large et ouverte, soit dirigée vers un but (Abraham, 2018). Lors de ce mécanisme de génération, il y a une alternance entre des processus d'analogie et la synthèse de ces associations. Ce mécanisme permet d'obtenir de nouvelles idées, qui lors de l'exploration, vont être évaluées (quelles sont leurs limitations, leurs implications potentielles, etc.). Par la suite, l'idée peut être

remodelée, modifiée ou remplacée en fonction des résultats de la phase d'exploration, en réamorçant la phase de génération et ainsi de suite jusqu'à ce que la « bonne idée » soit trouvée.

Un second modèle, le modèle « Analogies et Gestion de Contraintes » (A-GC) de la créativité, proposé par Bonnardel (2000; 2006), est dans la lignée du « Geneplore », avec, là aussi deux mécanismes qui entrent en jeu. Le mécanisme d'analogie, qui permet de générer de nouvelles idées en s'inspirant de ce qui est déjà connu. Et le mécanisme de gestion de contraintes, qui permet au sujet de prendre en compte les contraintes initiales ainsi que celles générées par chacune des idées produites, afin de s'adapter au contexte. Ainsi, selon ce modèle, il y a une alternance entre ces deux mécanismes jusqu'à ce que l'idée la plus novatrice soit trouvée.

Ces modèles qui s'inscrivent dans l'approche par les Processus, permettent de comprendre les grandes étapes aboutissant au processus créatif en décrivant des mécanismes communs à tous. Ce qui par définition exclut les différences possibles entre les individus. C'est en étudiant la créativité via les facteurs décrits dans l'approche par la Personne que la variabilité interindividuelle dans la production de la pensée créative peut être abordée. De ce point de vue, l'approche par la Personne et celle par les Processus semblent être complémentaires. Cette complémentarité des deux approches est d'ailleurs visible dans la littérature lorsqu'on s'intéresse à l'anatomie et au fonctionnement cérébral étudiés dans le contexte de la créativité.

d) Approche par la *Physiologie*

Bien qu'étant le dernier élément apporté au modèle de Rhodes, j'ai choisi de traiter l'approche par la « *Physiologie* » à la suite de l'approche par la « *Personne* » et par les « *Processus* » au vu de leur complémentarité.

Plusieurs méthodes existent pour étudier la physiologie cérébrale. Par exemple, l'électroencéphalogramme et la stimulation transcrânienne ont permis de faire le lien entre certaines structures cérébrales et la créativité (Chi and Snyder, 2011; Ivancovsky et al., 2019; Sasaki

et al., 2019; Sasaoka et al., 2014; Weinberger et al., 2017). Dans le contexte de ma thèse, je me suis focalisée sur l'IRM, car c'est une technique d'imagerie qui a une excellente résolution spatiale, et l'évolution récente des technologies a permis d'améliorer considérablement sa résolution temporelle, ce qui en fait un outil de prédilection pour l'étude du cerveau et de ses pathologies. C'est pourquoi je me focaliserai dans cette section sur les recherches qui ont été menées en IRM anatomique et fonctionnelle.

i) IRM anatomique et créativité

Les recherches réalisées chez des participants sains en IRM anatomique mettent en évidence un lien entre l'épaisseur corticale, le volume cérébral ou encore le taux de myélinisation de certaines structures et la créativité. Ces études révèlent que selon le rôle des régions dans les processus créatifs, l'épaisseur corticale et le volume cérébral vont être soit augmentés soit diminués chez des personnes très créatives (Cousijn et al., 2014a; Hahm et al., 2019; Vartanian et al., 2018). Li et collaborateurs (2015) ont étudié le lien entre le volume de la matière grise, les traits de personnalité et les traits de pensée créative (imagination, curiosité, défi et prise de risque). Ils ont mis en évidence qu'il y avait une augmentation du volume cortical dans le gyrus temporal médian et inférieur droit corrélé à ces traits de créativité. Ces régions sont associées à des processus sémantiques et notamment la génération de nouveaux liens entre différentes idées. Grâce à un modèle intégrant ces trois variables, les auteurs ont démontré que le trait de personnalité d'ouverture à de nouvelles expériences est le lien intermédiaire qui permet une corrélation entre le volume cortical de ces régions et les traits de créativité d'imagination et de curiosité. Ils ont également démontré que la baisse du volume de matière grise dans le gyrus précentral gauche, le gyrus frontal médian gauche et le cortex orbitofrontal était corrélée aux traits de créativité. Ces trois régions sont impliquées dans l'inhibition. Pour les auteurs, la baisse du volume de matière grise dans le gyrus précentral et le gyrus frontal médian provoquerait une baisse de l'inhibition, qui induit une augmentation de la prise de risque et du défi. En revanche, les auteurs interprètent la baisse du volume du cortex orbitofrontal comme une augmentation de la pensée intuitive du fait de son rôle dans la régulation

des émotions, des stimuli non désirés et de la motivation. Ces résultats sont à relier aux théories cognitives de la créativité.

Taki et collaborateurs (2013) ont mené une étude longitudinale sur 6 années afin d'étudier l'évolution du volume de matière grise et des traits de personnalité au cours du temps. Ils ont tout d'abord montré que les traits de personnalité sont stables dans le temps. Ils ont ensuite montré que les participants qui présentent une perte de matière grise dans le lobule pariétal inférieur droit au cours du temps ont un faible taux d'ouverture à de nouvelles expériences. Par ailleurs, le fait que le lobule pariétal inférieur soit impliqué dans la mémoire de travail suggère une atteinte de cette dernière.

D'autres études ont été faites sur la structure et l'intégrité des fibres axonales notamment grâce à la mesure de la fraction d'anisotropie (FA). Certaines de ces études tout comme pour le volume cortical et l'épaisseur corticale, montrent soit une baisse soit une hausse de la myélinisation des fibres selon les régions impliquées. Takeuchi et collaborateurs (2010b) ont principalement montré une corrélation positive entre la créativité et le taux de FA dans le lobe frontal, le corps calleux et la jonction temporo- pariétale. Ces trois régions sont respectivement impliquées dans trois fonctions primordiales pour la créativité, à savoir la mémoire de travail, la communication interhémisphérique et l'intégration multimodale de l'information. Ici, une plus grande FA indiquerait donc une plus grande myélinisation des fibres dans ces régions et par conséquent une augmentation de l'efficacité des fibres axonales ce qui induit un meilleur traitement de l'information.

D'autres études ont montré une baisse de la myélinisation dans certaines régions (Yasuno et al., 2017). Récemment Wertz et collaborateurs (2020) ont démontré qu'il y avait une corrélation négative entre les performances en créativité et le taux de FA dans le fasciculus uncinat droit qui relie le lobe orbitofrontal et le gyrus frontal inférieur au lobe temporal. Ce faisceau de fibres est lié à la remémoration de précédents événements grâce à la mémoire épisodique. Les auteurs interprètent une baisse de FA comme une augmentation de la perméabilité de la gaine de myéline,

ce qui induit une augmentation du temps de conduction. Comme nous l'avons vu, avec l'étude de Li et collaborateurs (2015), le lobe frontal et notamment orbitofrontal est fortement impliqué dans des processus d'inhibition. Ainsi une baisse de conduction des fibres induit un ralentissement de l'influx nerveux qui dans le cadre de l'inhibition va induire une baisse du contrôle cognitif.

Ces études montrent que l'épaisseur, le volume cortical et le taux de myélinisation sont des marqueurs intéressants car leur évolution peut être corrélée avec celle de mesures cognitives impliquées dans la créativité. Elles permettent donc de proposer des explications anatomiques face à des niveaux différents de créativité. Ainsi, grâce à ces mesures nous pouvons étudier le substrat biologique qui permet l'émergence de la créativité.

ii) IRM fonctionnelle et créativité

L'IRM fonctionnelle (IRMf), qui permet d'étudier de façon indirecte les activations cérébrales d'un individu au cours du temps, est largement utilisée pour essayer de mieux comprendre quelles régions cérébrales sont impliquées dans le processus de créativité. Ainsi, on peut distinguer deux types d'approches différentes, une approche dite locale et une approche dite globale.

L'approche locale permet d'étudier l'activation d'une région cérébrale pendant une tâche donnée et d'évaluer sa connectivité fonctionnelle avec d'autres aires cérébrales au cours de cette tâche. Ces études ont démontré une implication des mêmes régions mises en évidence par les études en IRM anatomique à savoir le cortex frontal médian, le lobe pariétal inférieur, le cortex orbitofrontal et le gyrus temporal médian, mais également d'une autre région appelée le precuneus (Benedek et al., 2014a; Limb and Braun, 2008; Mayseless et al., 2015; Wu et al., 2016). Le precuneus est une région corticale associative, qui projette vers des régions oculomotrices et sous-corticales. Ses fonctions majeures en imagerie mentale visuelle et récupération d'évènements dans la mémoire épisodique, en font une structure essentielle à la créativité (Cavanna and Trimble, 2006; Chen et al., 2015; Takeuchi et al., 2011). Tik et collaborateurs (2018) ainsi que Huang et collaborateurs (2018) ont mis en évidence que le système dopaminergique de la récompense était fortement activé lors

de « l'insight », c'est l'étape d'illumination du modèle de Wallas, pendant laquelle la solution à un problème nous apparaît sans vraiment savoir comment. Tik et collaborateurs (2018) montrent, une activation du gyrus temporal médian et du cortex préfrontal dorsolatéral, mais également des activations dans le thalamus, l'hippocampe, l'aire tegmentale ventrale, les noyaux accumbens et les noyaux caudés. Huang et collaborateurs (2018) quant à eux, démontrent que l'évaluation de la pertinence d'une idée dans le cadre de l'insight était sous-tendue par la jonction temporo-pariétale, l'hippocampe (mémoire épisodique), l'amygdale (émotion) et le cortex orbitofrontal (système de la récompense). Ainsi, l'illumination serait un moment de formation d'idée et d'apprentissage renforcé par les composantes de récompense et d'émotion, médié par la voie dopaminergique.

La seconde approche utilisée en IRMf est l'approche globale qui permet l'étude de l'activité cérébrale au repos, c'est-à-dire lorsqu'un individu est allongé les yeux ouverts ou non et qu'il laisse ses pensées vagabonder sans se fixer sur une idée précise. Cette activité cérébrale au repos est caractérisée par l'activation de plusieurs réseaux que l'on retrouve chez tous les individus sains. Ces réseaux de repos sont au nombre de 7 : le réseau du mode par défaut (DMN pour « Default Mode Network »), le réseau exécutif (ECN pour « Executive Network »), le réseau de saillance (SN pour « Salience Network »), le réseau attentionnel (AN pour « Attentional Network »), le réseau sensori-moteur (SMN pour « Sensori-Motor Network »), le réseau visuel (VN pour « Visual Network ») et le réseau auditif (AUN pour « Auditif Network »). Ces réseaux de repos sont considérés comme des états préparatoires qui maintiennent le cerveau prêt à traiter de nouveaux stimuli (auditif, visuel ...) et à y répondre de façon efficace.

Les études qui se sont intéressées aux réseaux de repos en lien avec la créativité ont permis de mettre en évidence des liens entre la créativité et le DMN, l'ECN et le SN (Beaty et al., 2019, 2017, 2014; Shi et al., 2018; Zhu et al., 2017). Le DMN est notamment lié à des processus de génération d'idée (Andrews-Hanna et al., 2014) et la génération de pensée interne (Benedek et al., 2016; Raichle et al., 2001). De nombreuses études ont montré son lien avec des processus qui favorisent

la créativité comme notamment la pensée spontanée et l'errance de la pensée (Marron et al., 2018). L'ECN est quant à lui associé à des processus de sélection et d'amélioration des idées au travers de processus convergents de la créativité (Cole and Schneider, 2007). Pour ce qui est du SN, il est impliqué dans la détection des idées pertinentes et il permet une transition dynamique entre le DMN et l'ECN (Beaty et al., 2015; Jung, 2013).

Les traits de personnalité liés à la créativité ont aussi été étudiés par l'approche globale. Beaty et collaborateurs (2018) ont, par exemple, démontré que l'ouverture aux nouvelles expériences était corrélée à une augmentation de la connectivité fonctionnelle entre le DMN et l'ECN, ainsi qu'au temps passé dans quatre états de repos, le DMN, l'ECN, le SN et l'AN. Dans la littérature actuelle, très peu d'articles font état de l'implication potentielle du réseau attentionnel, ce qui est assez étonnant car, comme nous l'avons vu dans les précédentes approches, l'attention joue un rôle crucial dans toutes les théories cognitives sur la créativité. C'est pour cela qu'une partie de mon travail a été de définir si le réseau attentionnel joue un rôle dans la créativité. Les résultats sont présentés dans la partie 1, chapitre 3.

Malgré les résultats décrits ci-dessus, il est important de noter qu'il y a un manque de littérature sur la connectivité fonctionnelle de repos en lien avec les performances créatives. En effet, la quasi-totalité des études sont faites avec une approche locale qui étudie l'activation d'une région appartenant à un réseau de repos puis un lien indirect est fait avec le réseau de repos lui-même. Etant donné la stabilité dans le temps de ces réseaux qui traduisent d'un fonctionnement cérébral de base, ainsi, il est important de développer cette littérature afin de mieux cerner les possibles changements de connectivité fonctionnelle au repos liés à la créativité et l'implication qu'ils pourraient avoir sur la façon de penser de l'individu.

e) Approche par les *Pressions*

L'approche par les « *Pressions* » regroupe de multiples facteurs environnementaux qui peuvent influencer les performances créatives. Certains de ces facteurs sont subis par l'individu comme par exemple sa culture, alors que d'autres sont plus malléables, le sujet peut alors agir dessus comme par exemple ses interactions sociales ou encore les substances qu'il absorbe.

i) *Environnement socio-culturel*

- Social

L'impact de l'environnement social des individus sur la créativité a principalement été étudié dans le cadre du travail. Par ailleurs, la finalité de ma thèse est de permettre la réinsertion sociale et professionnelle de patients traumatisés crâniens, il est donc nécessaire de bien cerner l'impact positif et négatif des facteurs sociaux liés au monde du travail sur la créativité afin de ne pas le négliger lors des séances de rééducation. Pour ces deux raisons cette section est orientée sur le facteur social dans le monde du travail.

L'espèce humaine se caractérise par des interactions sociales très riches et nombreuses, dont une grande partie se déroule dans le cadre du travail. Amabile (2013) évoque ces facteurs comme pouvant être néfastes à la créativité. C'est le cas des critiques sévères envers des idées nouvelles, ou bien d'une pression temporelle trop importante ou encore d'une attitude de non-prise de risque envers les supérieurs par peur du jugement. Cependant, ces facteurs sociaux peuvent aussi être bénéfiques à la créativité. C'est le cas par exemple des facteurs de mixité qui induisent des échanges entre des équipes aux compétences différentes, ou du facteur de liberté qui permet une liberté de penser dans la façon d'aborder un problème et la gestion du temps, ou bien encore des facteurs favorisant les relations positives avec la hiérarchie grâce notamment à l'encouragement au développement d'idées nouvelles et une reconnaissance appropriée du travail créatif.

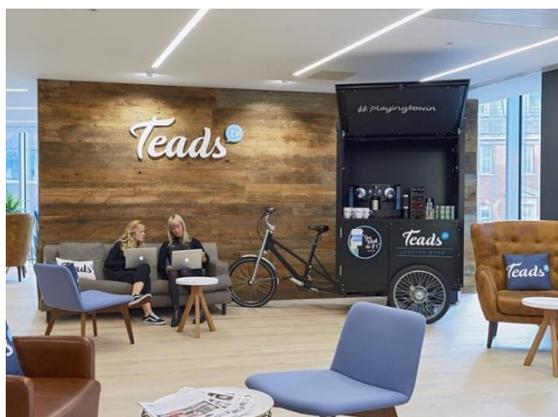
De façon plus générale, sur la base des travaux de Csikszentmihalyi (1990), Simonton (2000) décrit la créativité comme étant le fruit de l'interaction entre trois sous-systèmes : l'individu, le

domaine qui réfère aux règles et techniques spécifiques au contexte dans lequel évolue l'individu (ex : les neurosciences) et le champ qui réfère aux personnes travaillant dans le même domaine que l'individu (ex : tous les neuroscientifiques à travers le monde). Ainsi, il est important de ne pas négliger la part de l'interaction avec ses semblables car ce sont eux qui vont déterminer de l'originalité des travaux. En effet, il a été montré que l'entourage de travail est important pour stimuler la créativité (Fink et al., 2010). De même, Gong et collaborateurs (2019) ont démontré, par une étude menée sur 235 participants, que le feedback donné par les collègues de travail avait un effet bénéfique sur les performances créatives. De plus, Amabile et collaborateurs (1990) ont étudié l'impact de différents effets sociaux sur la créativité, en demandant aux participants d'écrire des poèmes originaux tout en leur donnant des consignes spécifiques afin d'étudier trois effets distincts. Le premier testé était l'effet de l'évaluation, étudié en précisant que leur travail allait être noté par des experts. Le deuxième effet étudié était la coaction, étudié en plaçant le sujet dans une pièce avec 3 autres participants installés en cercle. Le troisième était l'effet de la surveillance sur la créativité. Pour étudier ce dernier, des participants séparés en deux groupes devaient effectuer une tâche créative artistique. Le premier groupe était placé dans une pièce sans miroir. Le second était placé dans une pièce avec un miroir visible, et l'expérimentateur faisait croire aux sujets que des personnes allaient les observer, depuis la pièce d'à côté à travers le miroir pendant qu'ils créaient leur œuvre. Les résultats ont montré que le fait d'être évalué avait un impact négatif sur la créativité, que d'être sous surveillance induisait un léger effet négatif sur les performances créatives alors que la coaction n'avait aucun effet.

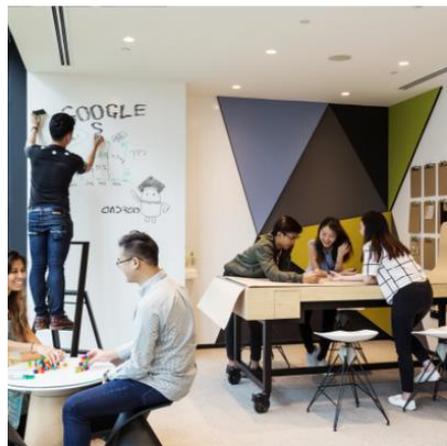
Ces expériences démontrent l'importance du contexte social sur la créativité et comme le suggère Amabile et collaborateurs, qu'il convient de faire attention à l'environnement de travail des employés pour qu'il soit propice à leur créativité et ainsi augmenter la compétitivité des entreprises. Dans cette optique, de grandes enseignes mais aussi de nouvelles start-ups ont mis en place un environnement de travail favorable à la créativité. C'est notamment le cas de Google ou Teads

(entreprise française de marketing) qui font tout pour favoriser les échanges et établir une atmosphère de travail plus conviviale (Figure 3). Dans le cadre de ma thèse, ce facteur sera pris en compte lors des séances de rééducations avec les patients afin de les placer dans un environnement favorisant leur expression créative et donc leur récupération.

Figure 3 : Exemples d'environnements de travail propices à l'échange et stimulant la créativité



Teads, Montpellier



Google, Singapore

- Culturel

Parmi les facteurs qui influencent la créativité, l'expérience de vie du sujet, notamment son environnement socio-culturel et les diverses expériences vécues au cours de sa vie ne sont étudiés que depuis récemment. Selon Güss et collaborateurs (2009) un individu se forme et s'adapte en fonction du milieu écologique, politique et culturel dans lequel il évolue. Comme nous l'avons vu précédemment, la créativité dépend du regard que vont porter les autres sur le travail qui va être effectué. En ce sens, certaines cultures ont des normes plus strictes qui vont entraver certains processus créatifs. Par exemple, dans la culture asiatique, malgré une volonté de créer et d'innover très présente, la créativité n'a de sens que si elle apporte une contribution sociale et morale. Il est même fait état d'une peur et d'un rejet face à des idées trop créatives (pour revue voir Shao et al., 2019), ce qui a un effet sur les processus engagés lors de la production créative. Les cultures occidentales donnent plus d'importance à la nouveauté, favorisant les processus de flexibilité, augmentant ainsi le nombre de réponses fournies, alors que les communautés orientales se focalisent plus sur l'utilité et le but du problème ou de la tâche, favorisant ainsi des processus de

persévérance, ce qui induit un faible nombre de réponses mais qui sont plus originales (Saad et al., 2015). Selon les cultures il existe donc une perception différente de ce qu'est la créativité, il est donc important d'en tenir compte lors de son étude. Ainsi, comme le souligne Shao et collaborateurs (2019) dans leur revue, il est nécessaire d'adapter les mesures de créativité au contexte culturel dans lequel nous nous trouvons pour correctement mesurer la créativité.

De plus, avec l'augmentation des échanges à travers le monde, l'exposition à d'autres cultures devient inévitable et de plus en plus de personnes issues de plusieurs cultures voient le jour. Les recherches menées sur l'impact des expériences multiculturelles ont démontré que l'interaction multiculturelle (c'est-à-dire l'échange entre des personnes de cultures différentes) est corrélée positivement à la créativité. Cette exposition permettrait d'élargir les connaissances de l'individu et d'augmenter sa créativité (Hermida et al., 2019). Dans cette même optique, les étudiants qui ont l'intention d'étudier dans des pays étrangers font preuve de plus de flexibilité et d'ouverture d'esprit et ont de meilleures performances créatives. Ce résultat, selon Zhao et collaborateurs (2019), serait médié par de meilleures performances en anglais afin de s'adapter au pays d'accueil. En effet, de nombreuses études ont démontré, aussi bien chez des enfants que des adultes, que l'apprentissage d'une seconde langue est lié à de meilleures performances en créativité (Hommel et al., 2011; Kharkhurin, 2011; Wang et Cheng, 2016).

Il faut également noter que l'interaction multiculturelle et l'exposition à diverses expériences de vie peuvent avoir un coût assez important auquel seules les familles les plus aisées peuvent faire face, induisant ainsi une corrélation entre le niveau socio-culturel et la créativité (Xu et Pang, 2020). Cependant, nous pouvons raisonnablement penser qu'avec le développement d'internet et des moyens de communications qui évoluent sans cesse, les individus issus de familles à faible niveau socio-culturel auront désormais des chances équitables et que cet écart pourra se réduire dans les années à venir.

ii) Substances

La créativité est souvent associée à la rêverie, à des états seconds qui seraient propices à la mise en lien d'évènements a priori sans rapport, favorisant la créativité. Dans ce contexte, nous pouvons nous interroger sur l'impact de certaines substances telles que les drogues hallucinogènes sur nos capacités créatives. Pour comprendre l'impact de ces substances sur le cerveau il faut avant tout savoir à quel niveau elles interviennent. Nous avons vu précédemment que d'un point de vue physiologique, 3 réseaux de repos sont impliqués dans la pensée créative, le DMN, l'ECN et le SN. Ces réseaux de repos interagissent avec des régions sous-corticales et notamment le thalamus dont la densité des récepteurs dopaminergiques D2 est négativement corrélée à la créativité. Moins de récepteur D2 signifie un seuil de décharge plus bas et ainsi une meilleure communication thalamo-corticale, augmentant les performances créatives. D'autre part, l'aire tegmentale ventrale qui fait partie du SN et qui est à la base du circuit dopaminergique, est régulée par la sérotonine (5-HT), notamment les récepteurs 2A qui ont un rôle excitateur. Les drogues psychédéliques sont des molécules agonistes des récepteurs 5-HT_{2A}, et stimulent la libération de dopamine (Canal, 2018; Kuypers, 2018; López-Giménez and González-Maeso, 2018). Le système dopaminergique est impliqué dans la motivation et la récompense, il y a donc une augmentation de la sensation de bien-être chez les personnes qui utilisent ce type de substance. De plus, la dopamine est liée à la désinhibition cognitive (Dimkov, 2018). Comme nous l'avons vu plus tôt, les émotions, la motivation et la désinhibition cognitive sont favorables à la créativité. Pour finir, des substances plus bénignes comme la nourriture, ont également des effets indirects sur les performances cognitives et la créativité (Colzato et al., 2015; Poulou et al., 2017; Strasser et al., 2016). Par exemple, la caféine permet d'augmenter les capacités de concentration, et de focus attentionnel qui sont des compétences essentielles à la pensée convergente et peuvent ainsi augmenter les performances créatives (Shabir et al., 2018; Zabelina et Silvia, 2020).

Les travaux portant sur les « Pressions » influençant la créativité montrent donc que l'environnement socio-culturel ainsi que certaines substances ont un impact sur le comportement

mais aussi sur le fonctionnement cérébral de l'individu, influençant aussi la créativité. Ce constat montre bien que la créativité et le potentiel créatif d'un individu ne sont pas figés dans le temps, mais au contraire qu'il s'agit d'une capacité malléable, ce qui est une information cruciale lorsqu'on travaille dans le domaine de la réhabilitation cognitive.

Grâce à ces quatre approches (*personne, processus, physiologie et pressions*) nous avons vu que les facteurs pouvant influencer la créativité sont très nombreux et variés. Afin d'étudier leur impact sur les processus créatifs, il est important d'utiliser des outils d'évaluation des capacités créatives adaptés. La dernière approche que nous allons aborder est celle par le *Produit*, elle permet de mesurer et caractériser la créativité à travers différents tests.

f) Approche par le *Produit*

L'approche par le « *Produit* » est l'étude de la créativité à travers la réalisation créative, pouvant être une réponse, une production ou une idée. L'évaluation de cette sortie peut se faire de façon subjective à travers des questionnaires d'auto-évaluation tel que le WCAT qui permet d'évaluer, à travers 50 items, 4 traits de créativité qui sont l'imagination, la curiosité le défi et la prise de risque (Lin and Wang, 1994). La créativité peut aussi être évaluée subjectivement par d'autres personnes (par exemple lors de la cotation de l'originalité) ou de façon objective par des mesures (nombre de réponses, catégories sémantiques différentes explorées ...). Différents tests ont été élaborés pour étudier la créativité, ils abordent soit l'aspect convergent (une seule réponse possible) soit l'aspect divergent (plusieurs réponses possibles) de la créativité.

Pour les tests de pensée convergente, ce qui est généralement mesuré c'est la capacité à trouver la réponse attendue face à un problème posé (énigme, problème mathématique...). Le principal test utilisé pour mesurer la pensée convergente est le « Remote Associate Test » (RAT), en français le test des associations distales, développé par Mednick. Il consiste à trouver le mot commun à trois autres mots sans lien apparents entre eux. Par exemple, pour le trio « tube, banc et littéraire » la réponse attendue sera « essai » car ce mot associé à chacun des trois autres mots fait sens dans la

langue française. Ce test qui s'appuie sur la seule association d'idée, est critiqué notamment par Riegel et collaborateurs en 1966. De plus, le RAT présente des inconvénients tels que, par exemple, un effet de genre (Mednick, 1962; Mendelsohn, 1976; Sutin et al., 2009), qui n'est pas observé avec d'autres tests de créativité (Abraham et al., 2014), ou bien encore, comme le pointe Mendelsohn (1976), le fait que pour réussir ce test, il faut que les sujets puissent avoir à leur disposition les mots nécessaires à la résolution de l'énigme et y avoir accès. En d'autres termes, si une personne ne connaît pas le mot en question ou les associations attendues elle ne pourra jamais résoudre l'énigme, non pas à cause d'un manque de créativité mais à cause d'un manque de vocabulaire. Malgré ces critiques, le RAT est toujours utilisé car, à l'heure actuelle, il n'existe que très peu de tests de créativité et que tout comme le RAT, beaucoup de ces tests de convergence sont des tests verbaux comme les anagrammes, le test d'association de mots (en anglais « Word Association Test ») ou le test de chaîne d'association libre (en anglais « Chain Free Association »). La nature de ces tests de convergence pose donc un réel problème quant à ce qu'ils évaluent réellement : est-ce l'arborescence sémantique des sujets ou leur processus créatif ?

Concernant les mesures créées pour évaluer la pensée divergente, elles se basent sur les travaux de Guilford (1968) repris ensuite par Torrance (1976). Pour ces auteurs, 3 mesures permettent de rendre compte de la pensée divergente : 1) la flexibilité, c'est-à-dire le nombre de catégories différentes explorées au cours du test ; 2) la fluence qui est le nombre de réponses produites et 3) l'originalité qui est la rareté de la réponse produite au test par rapport à l'ensemble des réponses données dans un échantillon de population. On peut ainsi citer la tâche des utilisations alternatives ou « Alternative Uses Task » en anglais (AUT ; Guilford, 1950) qui consiste, comme son nom l'indique, à trouver des utilisations nouvelles à un objet, de même que la tâche des utilisations inhabituelles (en anglais « Unusual Uses Tasks » ; UUT). Ces deux tests peuvent être soit utilisés comme des tests convergents si une seule ou très peu de réponses sont demandées par objet, ou bien comme tests divergents si la consigne demande un maximum d'utilisations alternatives. Il

existe également la batterie de tests de la pensée créative de Torrance (en anglais « Torrance Tests of Creative Thinking » ; TTCT ; Torrance, 1972), une batterie de pensée divergente pour enfant. Elle inclut des tests verbaux tels que l'AUT et de la production écrite, mais aussi des tests figuratifs pour lesquels le participant doit compléter des esquisses de dessins ou créer un dessin original à partir d'une forme. Cette batterie est devenue une référence dans l'évaluation de la pensée divergente. Torrance en a développé une version pour adulte plus abrégée qui reprend des tests verbaux et figuratifs (« Abreviated Torrance Test for Adults », ATTA ; Goff and Torrance, 2002).

Ces tests de production créative sont de plus en plus utilisés en association avec de l'IRMf afin d'étudier les aires cérébrales impliquées dans la créativité (voir section I.c). Compte tenu des contraintes imposées par l'IRMf, il est plus pratique d'utiliser des tests basiques comme le RAT que des tests tels que l'ATTA. C'est pourquoi malgré ses limites décrites plus haut, le RAT reste largement utilisé en neurosciences pour l'étude de la créativité.

Pour conclure sur cette partie dont l'objectif est de faire un tour d'horizon des différents facteurs en lien avec la production créative, nous pouvons retenir que tous les aspects qui caractérisent l'individu, à savoir, l'intelligence, les émotions, la cognition, la personnalité, la condition physique jusqu'à sa physiologie cérébrale, ou bien encore l'environnement dans lequel il évolue peuvent impacter sa créativité. L'impact de ces différents facteurs sur la créativité est d'ailleurs assez bien décrit dans la littérature.

Néanmoins, de mon point de vue, une des difficultés liées à l'étude de la créativité et du potentiel créatif vient des interactions entre ces approches et de leur possible évolution dans le temps. Il est donc nécessaire d'étudier de la créativité en tenant compte de ces interactions, le but étant d'identifier celles qui lui sont propices. Or, à l'heure actuelle ces interactions sont peu documentées. En effet, dans la section suivante nous allons aborder les deux principaux modèles qui appréhendent la créativité avec une vue multidimensionnelle.

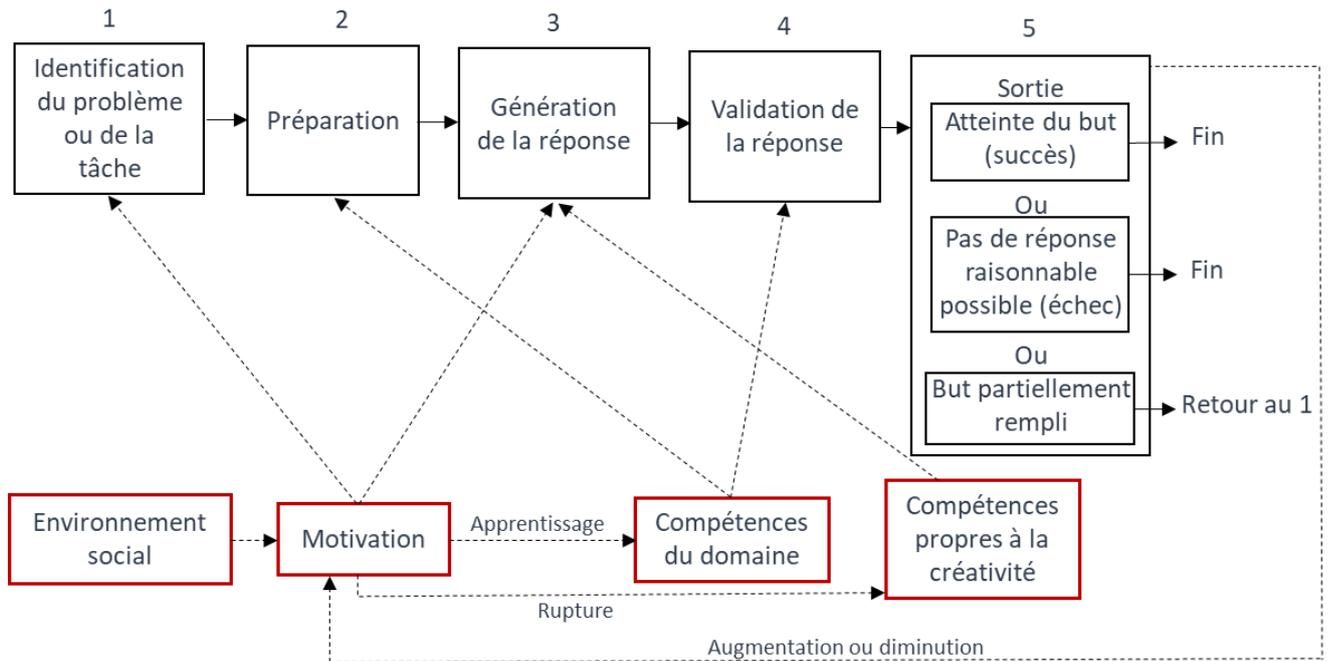
II. Les modèles d'interactions entre les différentes facettes de la créativité

Dans ce second point, nous allons aborder les deux principaux modèles qui ont été proposés pour essayer de comprendre l'agencement et l'interaction des différents facteurs entre eux.

a) Le modèle du cadre constructif de la créativité

Lors d'une première étude de 1983, renforcée par une seconde en 1988, Amabile a conceptualisé la créativité comme reposant sur trois grandes composantes : les compétences propres au domaine (talent dans le domaine, connaissances et compétences techniques requises), les compétences nécessaires à la créativité (compétences cognitives et organisationnelles nécessaires à la génération de nouvelles idées) et la motivation à exécuter la tâche (dépend également de l'environnement social). En partant de ce constat, et après une légère modification du modèle de Wallas, elle élaborera un nouveau modèle plus complet, le modèle du « cadre constructif de la créativité ». Elle fut la première à mélanger une approche personnelle de la créativité avec des aspects externes comme l'environnement social. Ce sont ces trois composantes qui vont impacter les différentes étapes du modèle de Wallas (Figure 4). A la différence du modèle de Wallas, qui n'explique pas les différences inter-individuelles, l'ajout des 3 composantes permet d'expliquer les différences inter- et intra-individuelle en créativité. Selon la sortie en étape 5 et en fonction de la personnalité du sujet, sa motivation va augmenter ou diminuer. Elle va impacter l'implication du sujet dans l'identification du problème ainsi que dans la génération des idées. Une forte motivation peut également créer une rupture dans l'enchaînement des différentes étapes et augmenter la probabilité de prise de risque augmentant ainsi les capacités créatives. Elle peut aussi engendrer une augmentation de la capacité d'acquérir plus de connaissances en lien avec le problème et donc augmenter les compétences dans le domaine. Quant à ces compétences dans le domaine, elles vont elles-mêmes impacter la préparation et la validation de la réponse. Dans son article de 1988 Amabile intègre à son modèle la composante d'environnement social du sujet, qui influence le modèle tout entier en impactant la motivation de l'individu.

Figure 4 : Modèle du cadre constitutif de la créativité adapté de Amabile 1983/1988



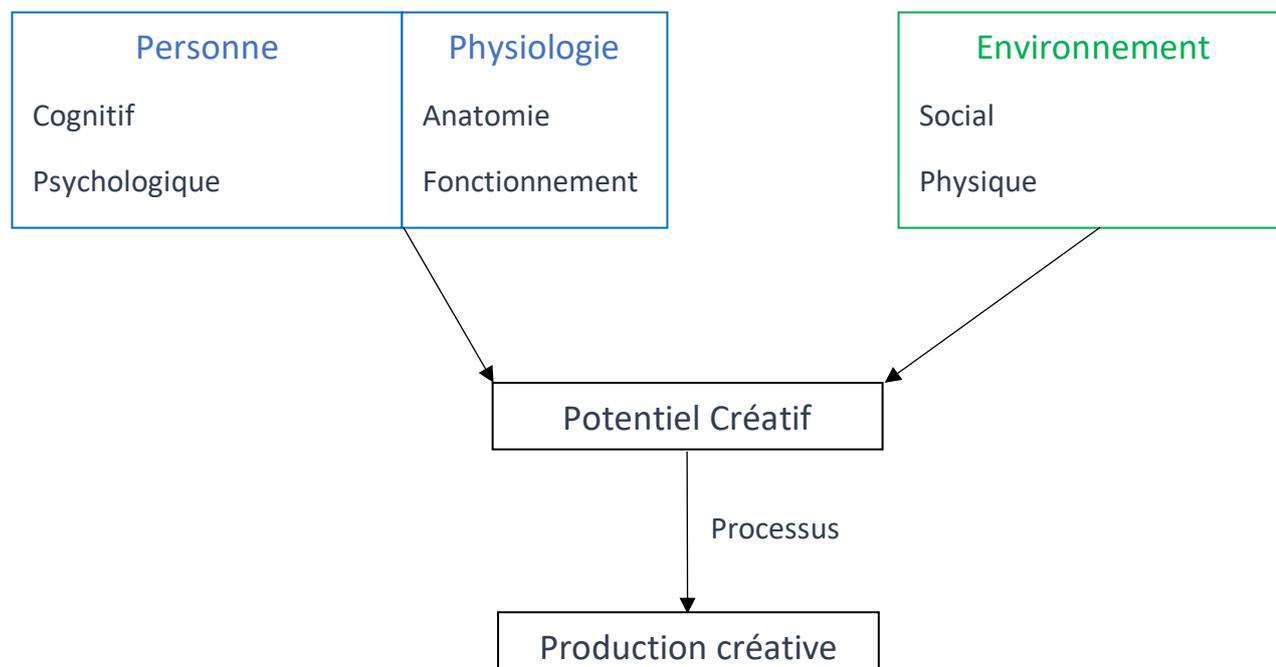
b) Le modèle Multivarié

Le second modèle d'interactions a été proposé par Lubart et ses collaborateurs (Lubart et al., 2015; Sternberg et Lubart, 1996). Ce modèle intègre quatre types de ressources nécessaires à la créativité : les ressources cognitives, conatives (ex. : la motivation), émotionnelles et environnementales. Ces ressources composent le potentiel créatif qui, via des processus de pensée créative tels que nous les avons vus dans la section précédente, permettent d'aboutir à une production créative. Pour Lubart et collaborateurs, ces ressources nécessaires à la créativité peuvent également interagir entre elles, créant ainsi un profil de potentiel créatif. Il s'agit d'une coaction perpétuelle, ce qui sous-entend une fluctuation dynamique du potentiel créatif au cours du temps.

Ainsi, le modèle présenté par Lubart et collaborateurs reprend le modèle de Rhodes en ajoutant des liens dynamiques entre les différentes approches. En effet, selon la vision de Lubart et ses collaborateurs, l'approche par la personne et par l'environnement sont les seules qui permettent d'expliquer des différences interindividuelles et constituent le potentiel créatif qui va être mis en

jeu par les processus afin d'aboutir à une production créative. Si on aborde ce modèle multivarié de cette façon, on peut ajouter l'approche physiologie qui complète la composition du potentiel créatif (figure 5).

Figure 5 : Modèle Multivarié adapté de Lubart et collaborateurs (1996 ; 2015).

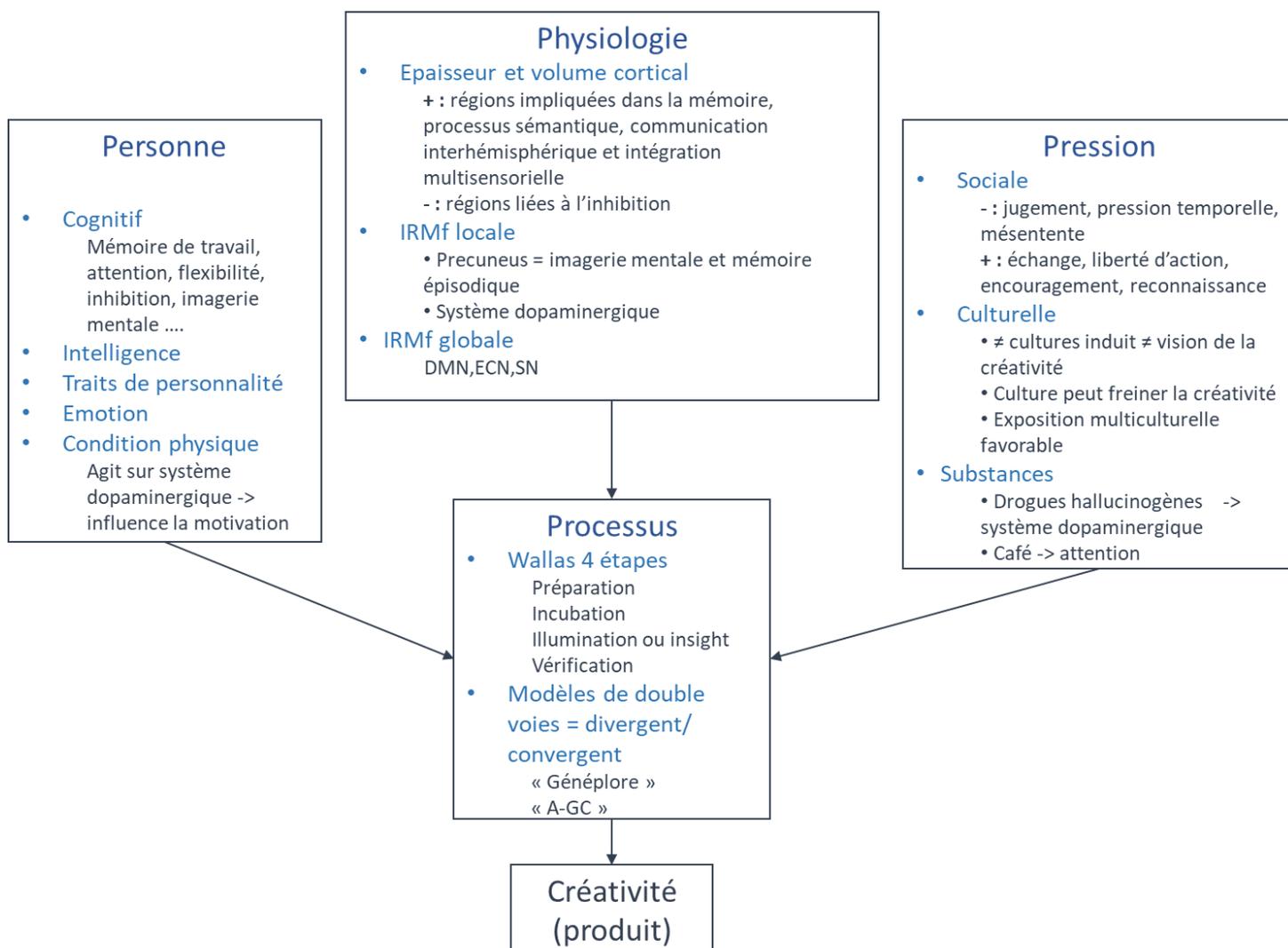


En conclusion de ce premier chapitre dédié à la caractérisation de la créativité, il ressort que chaque modèle et théorie proposé pour expliquer un des 5P du modèle de Rhodes, i.e. Personne, Processus, Physiologie, Pressions et Produit, ne peut à lui seul « expliquer » ce qu'est la créativité, car la production créative d'un individu est le fruit de multiples interactions entre des mécanismes communs à tous et des mécanismes propres à chaque individu influencé par divers facteurs issus de son environnement. L'ensemble des facteurs abordés dans ce premier chapitre, comme jouant un rôle dans la production créative d'un individu est résumé dans la Figure 6, qui conserve la nomenclature des 5P du modèle de Rhodes.

Aujourd'hui, pour permettre une meilleure compréhension de ce qu'est la créativité, il semble évident et nécessaire de s'orienter vers des modèles d'interactions, tels que ceux proposés par Amabile et Lubart et collaborateurs, qui prennent en compte un ensemble d'interactions favorisant ou défavorisant la créativité. Dans la même optique, les protocoles de recherche traitant de la

créativité devraient également se construire avec cette vision plus globale de la créativité. C'est donc en essayant de répondre à cette exigence que nous avons mis au point ma première étude présentée dans le chapitre 3 de cette première partie.

Figure 6 : Schéma récapitulatif des données bibliographiques du chapitre 1, adapté des modèles de Rhodes et Lubart et collaborateurs.



Chapitre 2 : Revue de littérature sur l'entraînement en créativité

Nous venons de voir dans le chapitre 1 que la créativité dépend de nombreux facteurs. Ainsi, il est raisonnable de penser qu'un entraînement jouant sur un ou plusieurs de ces facteurs puisse permettre d'améliorer la créativité d'un individu. Les entraînements développés dans ce but à l'heure actuelle sont présentés dans ce chapitre 2. Dans un souci de clarté, j'ai choisi de les décrire en gardant comme trame de présentation les approches issues du modèle de Rhodes, i.e. les entraînements qui se basent sur des facteurs issus de l'approche par la « *Personne* », de l'approche par les « *Pressions* » et enfin de l'approche par les « *Processus* ».

I. Approche par la Personne

a) Entraînement cognitif

L'entraînement des fonctions cognitives dont l'objectif principal est d'améliorer le fonctionnement mental de l'individu a largement été étudié au cours des dernières décennies. D'un point de vue neurobiologique, les effets bénéfiques de l'entraînement cognitif trouvent un cadre explicatif dans les concepts de réserve cognitive et de plasticité cérébrale. La réserve est indexée par le niveau d'éducation, la profession et les activités quotidiennes stimulantes. On peut donc penser que l'entraînement cognitif peut participer à augmenter le niveau de la réserve s'il est pratiqué régulièrement à une période de la vie de l'individu où cette réserve se construit. Cette dernière ne peut être dissociée du concept de plasticité synaptique selon lequel l'activité cérébrale possède la capacité à moduler sa propre fonctionnalité en remodelant en permanence sa neuro-architecture. Selon cette conception, l'entraînement cognitif entraîne l'activation de zones cérébrales et par voie de conséquence engendre des effets neuroprotecteurs qui favorisent des mécanismes de neuroplasticité et de réorganisation fonctionnelle renforçant ainsi la fonctionnalité des réseaux neuronaux.

Un certain nombre d'études réalisées chez l'animal confirment cette assertion. En effet, certains travaux rapportent une augmentation de la plasticité cérébrale après une stimulation cognitive chez le rongeur (Artola et al., 2006; Lambert et al., 2005). Des travaux issus du laboratoire ont également

montré qu'au cours du vieillissement, le placement à long terme des rats dans un milieu enrichi améliorait la mémoire (Paban et al., 2005) et était corrélée avec une up-régulation de gènes exprimant des molécules neurotrophiques dans le cortex frontal et l'hippocampe (Paban et al., 2011). Des résultats similaires sont observés chez l'homme. En effet, l'entraînement cognitif chez la personne âgée augmente le niveau de métabolites neuroprotecteurs dans l'hippocampe (Valenzuela et al., 2003) ainsi que le métabolisme cérébral au niveau du lobe frontal (Small et al., 2006). Valenzuela et collaborateurs (2008) rapportent également que le niveau d'activité mentale est inversement relié au taux d'atrophie hippocampique chez la personne âgée saine. Ainsi, il existe des évidences autant chez l'animal que chez l'homme pour considérer les facteurs cognitifs comme modérateurs dans le fonctionnement cérébral sain ou pathologique et comme agents protecteurs dans le développement de pathologie.

La littérature qui porte sur l'entraînement des fonctions cognitives est très large (Elmasry et al., 2015; Gates et al., 2019; Lawrence et al., 2017; Sprague et al., 2019; Tobar et al., 2017) et les bénéfices décrits s'étendent sur un spectre aussi large que le contenu des entraînements proposés. En effet, les bénéfices d'un entraînement vont varier selon que celui-ci sollicitera une ou plusieurs fonctions cognitives et stimulera d'autres sphères en plus de la sphère cognitive. En règle générale, il a été montré qu'un entraînement multi-cognitif est plus efficace que l'entraînement d'une seule fonction cognitive (Binder et al., 2016, 2015; Walton et al., 2015) mais qu'il est moins efficace qu'un entraînement holistique qui peut faire intervenir la sphère émotionnelle, motivationnelle ou certains facteurs environnementaux (Hardy et al., 2015; Ward et al., 2017). Ces effets bénéfiques sont observés aussi bien chez des sujets jeunes qu'âgés (Buitenweg et al., 2017; Chambon et al., 2014; Chambon and Alescio-Lautier, 2019; Nyberg, 2005) ou atteints de pathologies (Alescio-Lautier et al., 2019; Herrera et al., 2012; Penadés et al., 2013; Rodakowski et al., 2015; Twamley et al., 2003; Vemuri et al., 2016). De façon intéressante, il a également été montré que la méditation peut faciliter l'entraînement de certaines fonctions cognitives, notamment l'attention et le contrôle cognitif (Deepak, 2019).

En plus des effets bénéfiques sur le fonctionnement mental, ces entraînements peuvent moduler l'activité cérébrale. C'est le cas après différents type d'intervention cognitives comme un entraînement basé sur la mémoire de travail (Hempel et al., 2004; Jolles et al., 2010; Olesen et al., 2004), l'attention (Mozolic et al., 2010), les doubles tâches (Erickson et al., 2007), les jeux vidéo (Maclin et al., 2011) et la méditation (Tang and Posner, 2014). Cette modulation peut s'accompagner d'effets en profondeur sur l'architecture cérébrale (Glasø de Lange et al., 2017; Takeuchi et al., 2010; Taya et al., 2015). Ainsi, après cette rapide revue de la littérature sur les effets de l'entraînement cognitif, on notera que ses effets bénéfiques sur la cognition s'accompagnent de modifications de l'activité cérébrale dans des zones spécifiques ainsi que des changements morphologiques durables.

Comme nous l'avons vu plus haut, la créativité est en lien étroit avec plusieurs fonctions cognitives. Il est donc raisonnable de penser que l'entraînement de ces fonctions permettrait d'améliorer la créativité. La littérature sur l'impact d'un entraînement cognitif sur la créativité est peu étendue, mais va dans le sens de cette hypothèse (Scott et al., 2004).

Nous avons également mentionné que la méditation améliore les fonctions cognitives et permet d'améliorer la pensée divergente (Colzato et al., 2012; Ding et al., 2014) et qu'elle modifie également l'activité cérébrale pendant une tâche de créativité. En effet, Ding et collaborateurs (2014) ont démontré qu'à la suite d'un court entraînement en méditation, les participants présentaient une plus grande activité dans des régions cérébrales impliquées dans différentes étapes de la créativité mais également dans des processus émotionnels. De plus, les bénéfices observés à la suite de la méditation seraient prédictibles par l'humeur et les traits de personnalité de l'individu (Ding et al., 2015). Des entraînements plus focalisés sur les fonctions cognitives ont montré des résultats tout aussi intéressants, Memmert (2007) a montré chez des sportifs qu'un entraînement focalisé sur des aspects attentionnels permettait d'augmenter de façon significative les performances créatives. D'autres études ont montré des modifications cérébrales. C'est

notamment le cas de Wei et collaborateurs (2014) qui ont rapporté une amélioration des performances en créativité à la suite d'une stimulation cognitive, sous-tendue par une modification de la connectivité fonctionnelle entre le cortex préfrontal médian et le gyrus temporal médian. Ces régions sont impliquées dans des processus sémantiques et la pensée interne qui sont des processus importants et nécessaires à la créativité.

Ainsi, la créativité peut être améliorée suite à des entraînements basés sur l'attention ou la méditation et ces entraînements ont des effets en profondeur puisqu'ils modifient la connectivité fonctionnelle des participants. Cependant, il est nécessaire de mener d'autres études pour évaluer l'effet sur la créativité d'entraînements basés sur d'autres fonctions cognitives en lien avec celle-ci, telles que la mémoire de travail. De plus, il sera également nécessaire d'étudier le maintien à long terme de ces habiletés.

b) Entraînement par Biofeedback

Le biofeedback est de plus en plus utilisé afin de permettre aux individus de contrôler leurs états émotionnels ou cérébraux et de leur permettre d'être plus performants. C'est une technique qui donne accès au sujet, à son fonctionnement interne en lien avec la tâche qu'il effectue, lui permettant ainsi d'agir dessus en fonction de informations reçues. Il peut s'agir du rythme cardiaque, de la respiration, de la tension ou encore, dans le cas du neurofeedback, des ondes cérébrales. Le neurofeedback est une technique relativement simple, qui s'appuie sur le fait que certains états cérébraux sont favorables à la réussite de certaines performances, c'est le cas par exemple de l'onde alpha dans le cerveau. Le protocole consiste à placer une électrode au-dessus d'une zone cérébrale dont on sait qu'elle est spécifiquement impliquée dans la tâche effectuée. Le sujet au repos apprend alors à maintenir un taux voulu d'onde alpha. Ainsi au fur et à mesure des séances, du fait de sa concentration, sa motivation et son état d'éveil, le sujet va apprendre à influencer ses ondes cérébrales de sorte que lorsqu'il réalisera la tâche, il parviendra à maintenir ou retrouver un état cérébral propice à la réalisation de cette tâche. Cette technique a montré des

résultats intéressants sur l'augmentation de performances cognitives et notamment l'attention et la mémoire de travail qui sont deux piliers de la créativité (Wang and Hsieh, 2013). L'onde alpha est apparentée à des processus attentionnels internes et thêta à un état de rêve éveillé, ce sont des processus et états qui, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, favorise la créativité. Ces deux ondes cérébrales sont donc des candidates idéales pour un entraînement en neurofeedback visant à améliorer les processus créatifs. En effet, de nombreuses études ont montré les bénéfices d'un entraînement en neurofeedback basé à la fois sur des ondes alpha et thêta sur deux mesures de la créativité : l'élaboration et la flexibilité (Boynton, 2001; Gruzelier, 2009, 2014). Agnoli et collaborateurs (2018), se sont quant à eux intéressés à l'onde bêta qui est apparentée à des processus tels que le contrôle cognitif ou l'attention, et qui traduit l'engagement du sujet dans une tâche. Les auteurs ont comparé l'efficacité de deux protocoles en neurofeedback, l'un basé sur l'onde alpha et l'autre sur l'onde bêta. Ils ont démontré que l'onde bêta permettait une amélioration des mesures d'originalité et de la fluence ce qui n'est pas le cas pour l'onde alpha qui n'induit aucune amélioration de la créativité. Il est intéressant de noter que selon l'onde ciblée par l'entraînement, l'impact sur la créativité va être différent, i.e. entraîner les ondes alpha et thêta de façon simultanée permet d'améliorer l'élaboration et la flexibilité alors qu'entraîner l'onde bêta améliore la fluence et l'originalité. Cependant, entraîner l'onde alpha seule ne semble pas suffisante pour améliorer la créativité. Par ces résultats, il semblerait que le ratio alpha/thêta soit apparenté à des processus divergents alors que les ondes bêta sont, elles, révélatrices de processus convergents. Gruzelier et collaborateurs (2014) ont non seulement démontré une efficacité du neurofeedback alpha/thêta mais ont également montré qu'un entraînement en biofeedback sur le rythme cardiaque permettait de diminuer l'anxiété, un facteur qui freine la créativité, et donc de potentialiser cette dernière.

Ainsi, nous venons de voir qu'il est possible d'entraîner la créativité avec des contenus qui s'inscrivent dans l'approche par la « *Personne* ». Et que selon la méthode choisie, il est possible d'observer une amélioration directe de la créativité via l'évaluation de ses processus constitutifs,

i.e. originalité, flexibilité, fluence et élaboration. Mais il est également intéressant de noter qu'un entraînement de la créativité peut également avoir un impact positif sur certaines fonctions cognitives décrites dans la littérature comme ayant un lien étroit avec elle.

II. Approche par les pressions

Dans cette partie nous allons voir que l'approche par la « *Personne* » n'est pas le seul levier qu'il est possible d'actionner pour améliorer la créativité. Un entraînement s'inscrivant dans l'approche par les « *Pressions* » peut également avoir un impact positif sur la créativité.

Nous avons vu dans le premier chapitre que l'échange d'idées était favorable à la créativité. Par exemple, plus un individu est soumis à des idées rares et plus les idées qu'il proposera ensuite seront créatives (Yagolkovskiy, 2016). En effet, lorsqu'un individu est soumis à une idée peu commune, cela va activer de nouvelles cartes sémantiques qu'il va pouvoir combiner avec les siennes afin de trouver des idées encore plus originales. Dans cette optique, Osborn en 1957 a créé une activité créative de groupe, le brainstorming, qui repose sur quatre règles pour améliorer le processus de génération d'idée : 1) la critique est bannie, 2) laisser ses idées en roue-libre, 3) il faut de la quantité, et 4) la combinaison et l'amélioration des idées sont recherchées. Des entraînements se sont donc basés sur cette technique, permettant aux participants d'apprendre à exposer leurs idées et recevoir celles des autres afin de progresser en groupe. Depuis 1957, différents types de brainstorming ont été créés. Bonnardel et Didier (2020) ont mis au point deux variantes du brainstorming basées sur le modèle de double voie A-GC. L'une est centrée sur l'évocation d'idée (IE), elle repose sur quatre règles : 1) exprimer toutes les idées, 2) les écrire, 3) pas d'auto-censure, 4) utiliser des combinaisons différentes des idées exprimées afin d'en trouver de nouvelles. La deuxième variante est basée sur l'évocation des contraintes (CE), elle suit quatre règles également : 1) exprimer toutes les contraintes, 2) les écrire, 3) les classer dans l'ordre hiérarchique, 4) les combiner de façons différentes afin d'en trouver de nouvelles. L'IE favorise la pensée divergente alors que la CE favorise

les processus de pensée convergente. Leur étude a montré que chacune de ces variantes focalise l'attention sur un aspect du modèle, à la suite de l'IE les sujets ont énoncé plus d'idées que lors de la CE se focalisant ainsi sur la génération d'une multitude d'idées. A l'inverse, ceux entraînés par la CE se concentrent sur la vérification et l'étayage des idées. De plus, ils ont également observé que l'effet de chacun de ces deux types de brainstorming variait selon la population. Pour des étudiants en design la CE est plus bénéfique alors que pour des enseignants engagés au quotidien dans le design d'objets plus simples c'est l'IE qui permet une plus grande amélioration des performances créatives des sujets. D'après les auteurs, les étudiants en design auraient eu une éducation et un entraînement qui favorise la pensée divergente, faisant que cette capacité-là est déjà très développée chez eux, c'est pourquoi l'IE n'a pas eu beaucoup d'effet. Donc, pour contrebalancer cet effet et continuer à les améliorer, un entraînement qui se focalise sur les contraintes de la tâche est plus adapté. En revanche, pour la population de professeurs, leur expérience professionnelle basée sur la prise en considération et l'application de règles favorise une pensée convergente. C'est pourquoi, pour eux, un entraînement stimulant leur capacité à élargir leur espace de recherche est plus adéquat. Ainsi, cette étude souligne que pour un entraînement efficace, il est nécessaire de s'adapter à la population choisie.

Lors des sessions de brainstorming il a été montré qu'il pouvait y avoir une baisse de la productivité. Cette baisse serait due en partie à des aspects motivationnels (Diehl and Stroebe, 1987), mais aussi au niveau d'anxiété des sujets et de leur aisance à interagir au sein du groupe (Camacho and Paulus, 1995; Paulus and Dzindolet, 1993). Ainsi cette technique ne peut être efficace que pour des participants qui sont à l'aise pour interagir avec d'autres personnes, sinon le bénéfice de cette technique est annulé. Ceci fait ressortir une notion d'adaptation ou de personnalisation des entraînements qui doivent être propres à chaque individu. Ce point est particulièrement intéressant pour les patients traumatisés crâniens où chaque cas est différent et, par conséquent, où un entraînement spécifique prend tout son sens.

III. Approche par les processus

Les entraînements qui s'inscrivent dans l'approche par les « *Processus* » peuvent se faire de deux façons différentes. La première passe par un enseignement des étapes à suivre qui sont propices à la créativité et la deuxième par une exposition répétée à des problèmes créatifs.

a) Entraînement en métacognition

La métacognition est le fait de connaître ses compétences et son fonctionnement cognitif. Ainsi, enseigner la créativité, ses processus cognitifs et ses étapes constitue un entraînement en métacognition. Plusieurs protocoles ont été créés afin d'enseigner ces étapes et permettre d'améliorer la compréhension de la créativité. De manière générale, ils reposent tous sur le même principe : donner une piste sur le fonctionnement des processus créatifs. Les outils peuvent être variés : assister à des séminaires sur la créativité, faire des analogies, créer des cartes mentales sémantiques ou encore le brainstorming. L'ensemble de ces protocoles en métacognition a démontré une efficacité à améliorer les performances créatives (Althuizen et Reichel, 2016; Birdi, 2016; Birdi et al., 2012; Clapham, 2003; Copley, 2015; Scott et al., 2004). Certaines études ont mis en avant les implications spécifiques de ces entraînements. Ainsi, Dow et Mayer en 2004 ont démontré que les entraînements en métacognition, au même titre que les entraînements cognitifs sont domaines-spécifiques, c'est-à-dire qu'un entraînement en métacognition basé sur les processus de résolution de problèmes visuospatiaux va améliorer la résolution de problème visuospatiaux mais pas de problèmes sémantiques. Ce qui sous-entend donc d'une sous-catégorisation des problèmes créatifs. De plus, Bott et collaborateurs (2014) ont mis en évidence qu'un entraînement en métacognition sur les processus créatifs permettait d'améliorer la créativité par l'amélioration de certaines fonctions exécutives, à savoir l'attention dirigée et le traitement de l'information. Par ailleurs, Onarheim & Friis-Olivarius (2013) ont démontré que plus les participants sont au fait de leur fonctionnement cérébral, au plus ils seront en mesure de développer tout leur potentiel créatif. Ils ont démontré qu'ajouter la métacognition des neurosciences, en plus de

l'enseignement des étapes clefs et des processus cognitifs de la créativité, permettait aux sujets d'augmenter encore plus leur potentiel créatif. Les auteurs concluent que des modifications biologiques doivent certainement avoir lieu pour modifier le fonctionnement cognitif des participants et qu'en les étudiants nous pourrions mieux comprendre les mécanismes cognitifs sous-jacents à cette amélioration. De plus, Ritter et collaborateurs, 2020 ont également mis en évidence que les protocoles en métacognition permettaient d'augmenter la créativité, mais ils ont aussi montré qu'au bout de 3 mois d'entraînement les effets étaient visibles et qu'au-delà de ce laps de temps, il n'y a pas d'amélioration significative, il y a donc une limite à l'augmentation de la créativité. Ces résultats mis en parallèle avec la conclusion d'Onarheim et Friis-Olivarius (2013), selon lesquels de telles modifications cognitives ne peuvent avoir lieu sans modifications du substrat neuronal, suggèrent que la plasticité cérébrale serait limitée. Par ailleurs, Saggari et collaborateurs (2016), ont mis en évidence des modifications cérébrales à la suite d'un entraînement en métacognition. Ils ont observé, en post-entraînement, une baisse de l'activité cérébrale lors de la tâche créative dans le cortex préfrontal dorsolatéral droit, le gyrus para-cingulaire, l'aire motrice supplémentaire ainsi que des régions pariétales. Ils ont également observé une augmentation de la connectivité entre le cortex et le cervelet qui traduirait d'une baisse de l'engagement des fonctions exécutives au profit du traitement implicite spontané. Ce résultat tend à confirmer que les modifications cognitives sont sous-tendues par des modifications cérébrales. Enfin, Kienitz et collaborateurs (2014) ont montré que les traits de personnalité, bien qu'invariants dans le temps, permettaient en revanche de prédire le taux d'amélioration de la créativité. Ce qui conforte l'idée d'une prédisposition innée latente qui, selon les individus, demande encore à être exploitée.

b) Entraînement par perfectionnement

L'exposition répétée à une tâche créative permet une amélioration des performances créatives du sujet. Cette augmentation est également accompagnée de modifications cérébrales, visibles aussi bien au repos grâce à la connectivité fonctionnelle de repos qui est augmentée dans le DMN,

le SMN, l'AUN et le AN (Fink et al., 2018), que lors d'une tâche créative. En effet, après l'entraînement il y a une modification de l'activité cérébrale lors de la tâche dans le lobe pariétal inférieur gauche et le gyrus temporal médian gauche (Fink et al., 2015). Au fur et à mesure des expositions, le sujet va perfectionner sa stratégie jusqu'à une optimisation complète de son potentiel, ce qui va engendrer des modifications dans cette structure cérébrale. Cependant, pour que ces modifications cérébrales aient lieu, il faut un certain laps de temps. En effet, Cousijn et collaborateurs (2014) n'ont montré aucune modifications cérébrales à la suite de 8 sessions d'entraînement malgré une augmentation des performances créatives, alors que les deux études de Fink et collaborateurs (2015 et 2018) proposant un entraînement de 18 sessions montrent des modifications cérébrales. L'entraînement doit donc être suffisamment long pour permettre le renforcement de ces nouvelles connections.

Lors du chapitre 1 nous avons vu que la créativité est complexe par la multitude de facteurs qui l'influencent et interfèrent entre eux. Au cours de ce deuxième chapitre nous avons donc abordé comment potentialiser notre capacité créative au travers de divers entraînements. La combinaison de deux facteurs semble essentielle pour un entraînement efficace : s'adapter à chaque individu et un nombre de séances suffisant pour induire des modifications au niveau de l'anatomie et du fonctionnement cérébral. Dans le contexte politique et économique actuel, la pression à l'innovation se fait de plus en plus pressante. Compte tenu du fait que la créativité peut être enseignée (Ferrari et al., 2009; Liu et al., 2020), et que l'adolescence semble être une période charnière au développement du potentiel créatif (Knoll et al., 2016; Stevenson et al., 2014), il serait intéressant de généraliser la stimulation de ce potentiel dans les collèges et lycées comme c'est le cas dans certaines structures pilotes (Denervaud et al., 2019).

Chapitre 3 : Expérimentations

A comprehensive approach to study the resting state brain network related to creativity

Deshayes C., Paban V., Ferrer M.-H., Alescio-Lautier B., Chambon C.

Article en révision, *Brain Structure and Function* BSAF-D-20-00098

Les recherches en créativité étudient généralement l'activité cérébrale de repos en utilisant les scores bruts du produit créatif. De plus, étant donné la multitude de facteurs qui peuvent impacter la créativité, nous pensons qu'il serait nécessaire d'évaluer le potentiel créatif des individus afin d'identifier les réseaux de repos strictement liés à leur capacité créative. C'est pourquoi dans cette étude nous avons souhaité analyser le potentiel créatif à travers un fonctionnement cognitif plus large qui rendrait mieux compte de la créativité des sujets et ainsi permettrait d'identifier de façon plus adaptée le fonctionnement cérébral basal des sujets au repos en lien avec ce potentiel.

Méthode : Nous avons différencié les participants à haut et faible potentiel créatif sur la base d'un modèle de fonctionnement cognitif créé en utilisant la modélisation d'équation structurelle (SEM-PLS), qui suppose une influence de la mémoire de travail et de la pensée analytique sur la créativité mesurée à travers le TTCT. Ensuite nous avons analysé les différences de connectivité fonctionnelle au repos entre ces deux groupes.

Résultats : Les sujets à haut potentiel créatif présente une corrélation positive entre la mémoire de travail et la créativité que nous ne retrouvons pas chez les sujets à faibles potentiels. Ce résultat cognitif est sous-tendu par une connectivité fonctionnelle de repos augmentée au sein du réseau attentionnel (AN) et du réseau du mode par défaut (DMN) chez les sujets à haut potentiel créatif, ainsi qu'une diminution de la connectivité fonctionnelle au sein du réseau de salience (SN).

Discussion : Mettre en perspective une approche globale au niveau cérébrale et cognitif a mis l'accent sur l'AN, qui est peu mis en évidence dans la littérature sur la créativité. Les régions de l'AN et du DMN dont la connectivité est augmentée sont impliquées dans l'imagerie mentale et les processus d'insight, des éléments essentiels à la créativité, ce qui confère à l'AN un rôle important dans la créativité.

A comprehensive approach to study the resting-state brain network related to creativity

DESHAYES Claire ^a, PABAN Véronique ^a, FERRER Marie-Hélène ^b, ALESCIO-LAUTIER Béatrice ^a, CHAMBON Caroline ^a

^a Aix-Marseille Université, CNRS, LNSC, Marseille France; 3 Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France.

^b Département Neurosciences et Contraintes Operationnelles (NCO), Institut de Recherche Biomedicale des Armées (IRBA) 91223 Brétigny-sur-Orge, Cedex, France

Corresponding author: Claire Deshayes, Laboratory of Sensory and Cognitive Neuroscience, UMR 7260, Aix Marseille University & French National Center for Scientific Research (CNRS), Centre Saint-Charles, Research Federation 3C-Case B, 3, Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France, claire.deshayes@univ-amu.fr
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0522-8250>

Declarations

Funding

This work was supported by a grant (ANR-15-CE19-0026-01) co-funded by the French National Research Agency (ANR) and the CNSA (National Solidarity Fund for Autonomy).

Conflicts of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

The opinions or assertions expressed herein are the private views of the authors and are not to be regarded as official or as reflecting the views of the French Military Health Service.

Ethics approval

The study was approved by the national research ethics committee (CPP n° 125-14) and was performed in accordance with the ethical standards described in the Declaration of Helsinki.

Consent to participate

Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Consent for publication

Not applicable.

Availability of data and material

Not applicable.

Code availability

PLS-SEM is available at www.xlstat.com.

SPM12 is a Matlab toolbox available at <https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software>.

Conn is a software based on MATLAB and is available at <https://www.nitrc.org/projects/conn>.

Author contribution statements

C. Deshayes and B. Alescio-Lautier developed the study concept; C. Deshayes, B. Alescio-Lautier, M. H Ferrer and C. Chambon contributed to the study design; C. Deshayes performed the experiments; C. Deshayes and V. Paban analyzed the data and prepared the figures; C. Deshayes and B. Alescio-Lautier interpreted the results of the experiments and wrote the manuscript. C. Chambon and V. Paban provided critical revisions. All authors approved the final version of the manuscript for submission.

Abstract

Studies related to creativity generally investigate brain activity at rest using raw scores from only one creative task. However, considering all the factors that can impact the creative product, we believe that the creative potential of individuals must be evaluated to identify the associated resting-state brain networks. Moreover, studying the brain functional connectivity related to creativity processes should be considered in conjunction with cognitive functioning as both are composite phenomena. To test this assumption, in this exploratory study, we differentiated high- and low-creativity potential people with a cognitive functioning approach using structural equation modeling assuming an influence of working memory (WM) and analytical thinking on creativity assessed by the Torrance Tests of Creative Thinking. Then, we examined brain functional connectivity at rest and found that highly creative people had increased connectivity in the attentional network (AN) and default-mode network (DMN) and decreased connectivity in the salience network (SN). Our findings highlight the involvement of the AN, which is very scarcely mentioned in the literature. We therefore linked this network to creative potential, which is consistent with cognitive theories suggesting that creativity is underpinned by attentional processes. Furthermore, studying creativity with an approach based on a model of cognitive functioning seems more consistent with how connectivity data are processed.

Key words: Creativity, fMRI, resting-state networks, cognitive processes.

Abbreviations:

Attentional network (AN); average variance extracted (AVE); Broadman Area (BA); default-mode network (DMN); executive control network (ECN); partial least squares – structural equation modeling (PLS-SEM); response time (RT); sustained attention (SA); salience network (SN); Torrance Tests of Creative Thinking (TTCT); working memory (WM).

Introduction

We owe everything to our creative ability: technology, research, medicine, facing the obstacles of life or even the entire human evolution depends on it. Creativity is defined by Lubart and collaborators (2003)¹ and Bonnardel (2002)² as “the ability to produce work that is both new and appropriate for the task”. Several theories have been advanced to account for the cognitive mechanisms involved in creativity. Mednick, in 1962³, hypothesized that creativity is supported by a flat associative hierarchy, i.e., the more remote the elements of a combination are from each other, the more creative the production becomes. In this theory, Mednick proposes that cognitive flexibility is a necessary process to propose creative combinations and thus new concepts. Mendelsohn, in 1976⁴, defined people with high creative abilities as being able to maintain several parallel cognitive flows and to switch between them to use information by relying on attentional

defocusing, which implies working memory (WM)⁵. Martindale, in 2007⁶, characterized creativity as a cognitive and behavioral disinhibition. Indeed, he argued that creative people can switch between a focused and defocused state of mind, which would be sustained by attentional flexibility. It is interesting to note here that for Miyake and collaborators (2000)⁷, flexibility is one of the basic elements of WM. Based on all these theories, De Dreu and collaborators (2008)⁸ suggested that creativity is composed of two pathways: the flexibility pathway, which follows the models of Mednick and Mendelsohn, and the persistence pathway, which allows us to explore all solutions until the correct one is found. The latter is characterized by a focused and structured exploration of a few cognitive categories⁹ as well as incremental research processes¹⁰ that depend on WM.

An important notion that should be considered when studying creativity is analytical thinking, which has always been opposed to creative thinking. Indeed, creative thinking enables innovative solutions to be produced based on synthesis skills that require WM, while analytical thinking allows existing ideas to be evaluated and tested based on discrimination skills¹¹. For Nijstad and collaborators (2010)¹², analytic thought alone cannot lead to creativity, so these two ways of thinking cannot occur at the same time.

From a brain function perspective, task-based fMRI or EEG studies have investigated specific brain activations related to creativity¹³⁻¹⁹. In these studies, the reported activations were registered during a creative task and were therefore specific to this task. Some works have also used a global approach to investigate differences between high- and low-creative people using raw scores by studying brain connectivity at rest²⁰⁻²⁶. The brain at rest is always activated, with some regions being coactivated at the same time. Resting-state networks reflect this coactivation, which can change over time. The work of many researchers²⁷⁻²⁹ led to the identification of 7 main resting-state networks: the default-mode network (DMN), the executive control network (ECN), the salience network (SN), the attentional network (AN), the sensorimotor networks (SMN), the visual networks (VN) and the auditory networks (AUN). The DMN, ECN and SN are the main networks reported to be involved in creativity^{22,30,31}. Surprisingly, the AN has not been highlighted, while attentional abilities have emerged from the current cognitive theories explaining the mechanisms underlying creativity.

Based on inconsistencies between cognitive theories highlighting attention as a key process in creative thinking and resting-state fMRI data that have not shown the AN to be the most important network in creative people, in the present exploratory study, we propose a different approach for studying not the creative product but rather the upstream cognitive processes that may participate in the creative potential of an individual. The most common approach used to study brain activation associated with creativity is to distinguish between high- and low-creative people on the basis of their raw scores in a creative task. We believe that an approach based on a model of cognitive functioning that would allow a more comprehensive understanding of creative potential would be more relevant than the use of raw scores.

To test this assumption, we used partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). As indicated above, WM seems to be important for creativity, while analytical thinking is not. Indeed, our cognitive model questioned the extent to which each of these two cognitive abilities may explain creative performance evaluated via the Torrance Tests of Creative Thinking (TTCT). We differentiated high- and low-creative potential people based on their composite scores in the path model. Then, an fMRI analysis at rest was performed to isolate the difference in brain functional connectivity patterns between individuals with high- and low-creative potential.

Method

Participants

We recruited 45 healthy subjects between 20 and 50 years of age (mean age \pm SD = 34.12 \pm 8.84 years; M/W=22/23; mean years of study \pm SD = 14.13 \pm 3.25). None of the participants reported any clinical or psychological disorders. In accordance with the Declaration of Helsinki, all the participants were fully informed of the experiment and provided their consent.

Cognitive assessment

Cognitive assessment was performed to evaluate the creative potential of the subjects as well as their WM and analytical thinking skills. To assess the creative potential, we used selected verbal and figural tasks of the TTCT form A. We selected verbal imagination tasks 1 to 3, 5 and 6 and imagination with drawings tasks 1 to 3. Tasks were scored following the guidelines derived from the TTCT^{32,33}. For each task, we considered flexibility, fluence, originality and elaboration score. WM was evaluated through the sustained attention (SA) task from the TAP battery³⁴. In this task, geometric figures of different shapes, sizes and colors are presented to the subjects. These figures appear one after the other in the middle of the screen, and the subject must press a button as quickly as possible when 2 consecutive figures are of the same shape or color. This task requires a great deal of WM for the updating that must be done at each trial. We measured the response times (RTs) and the percentages of correct answers. Analytical thinking was assessed with Luria problem solving, where we measured the percentage of correct answers, and with a modified computerized version of the Tower of Hanoi developed by the Biomedical Research Institute of the Armies (IRBA, Bretigny sur Orge, France). For the latter test, there are 5 difficulty levels corresponding to 1 to 5 disks that can be transferred among three bases presented on the screen. The disks form a pyramid on the left base, and the goal is to transfer the pyramid to the right base with a minimum number of moves. When doing so, the participant must follow several rules: only the disk on the top of the stack can be moved, only one disk can be moved at a time, and a larger disk cannot be placed on a smaller one. We recorded the RT and the number of moves.

PLS-SEM

PLS-SEM is an advanced statistical method based on exploratory techniques³⁵ that performs adequately with small sample sizes³⁶. We have previously described the method in Paban and collaborators (2018)³⁷. We used this method to evaluate the correlations between creativity and WM and analytic thought. PLS-SEM first analyzes the measurement model elaborated from indicator variables and then examines the structural model performed from our construct. The path model is translated into a set of equations describing a measurement model and a structural model³⁸. Briefly, in a first step, PLS-SEM validates the measurement model by assessing internal consistency, convergent validity (composed of the average variance-extracted scores for each construct and the outer loading for each indicator) and discriminant validity (composed of cross-loading). In a second step, PLS-SEM examines the structural model performed from latent variables by assessing the quality of relationships measured by the R^2 metric³⁹.

Participant separation

An ascending hierarchical classification analysis was performed to separate participants based on their score in the path model. Briefly, similarities between latent variables' scores of every pair of participants were evaluated by calculating the Euclidean distance between participants. Participants were grouped into clusters using Ward's aggregation method, which links pairs of subjects who are close together into binary clusters forming a hierarchical tree. Finally, cutting the tree at the maximum dissimilarity provided two distinct clusters highlighting two groups of subjects.

Statistical comparison of path coefficients between the 2 groups was performed using XLSTAT software (www.xlstat.com), which offers multigroup comparison methods in the framework of PLS path modeling presented by Goles and Chin in 2005⁴⁰. An adapted t-test based on bootstrap standard errors was used. Statistical significance was set at $p \leq 0.05$. Then, we considered the composite score calculated by the PLS-SEM model on the latent variable of creativity, and we calculated Student's t-test between the two groups of participants.

MRI acquisition

All subjects were scanned in a 3 T Siemens Prisma scanner (European Center for Research in Medical Imaging; CERIMED, Marseille, France) equipped with a circular polarized head coil. Images were acquired in the axial plane, parallel to the anterior-posterior commissure axis and covering the entire brain. We acquired T1 images (magnetization-prepared rapid gradient-echo (MPRAGE) sequence; TR=2.4 sec, TE=2.28 msec, flip angle = 8°, FOV= 256.0 mm, voxel size = 0.8 mm isotropic, and matrix = 256 × 256), and for the functional images, participants were asked to rest for 15 min

with their eyes closed but not fall asleep (TR = 780 msec, TE = 30 msec, flip angle = 54°, FOV = 210 mm, voxel size = 2.5 mm isotropic, matrix = 210 × 210, slice thickness = 2.5 mm, 0.75 mm gap, and 1145 volumes). At the end of the scan, we asked participants whether they had fallen asleep during this 15 min resting-state period. None of them had fallen asleep. One subject did not close his eyes during the resting state, and so we discarded his data from the fMRI analyses.

MRI preprocessing and processing

Images from each subject (n=44) were preprocessed using the MATLAB toolbox SPM12 (MATLAB v18b) to correct distortion and movements (Voxel Distortion Maps were calculated based on individual field maps and then realigned and unwarped), and the anatomic data were realigned in the same space (coregister estimate) and segmented according to different brain tissues (segments: gray matter, white matter, LCR, bone tissue, soft tissue and residual tissue). Following this step, we normalized our data into the space defined by the Montreal Neurological Institute (MNI) using the DARTEL toolbox. Finally, the functional images were smoothed with a Gaussian Kernel of 6x6x6 mm to correct anatomical-functional variability. Because we were interested in the DMN, the ECN, the SN and the AN, we decided to use the ROIs derived from Allen and collaborators (2011)²⁷ (DMN, AN) and Raichle (2011)²⁸ (DMN, ECN, SN) (cf. Table 1). Masks were created for each selected ROI from the DMN, ECN, SN and AN (*MarsBar*). In the Conn toolbox (*Conn toolbox v17 f*), images were bandpass filtered at 0.009 Hz - 0.08 Hz to reduce the effect of low-frequency drift and high-frequency noise. The Artifact Detection Toolbox (ART) was used to identify outliers. For denoising, white matter, cerebrospinal fluid, motion and ART outliers were taken as confounders and removed from the signal by regression⁴¹. Finally, a functional connectivity analysis was performed using an ROI-to-ROI analysis (the DMN, ECN, AN and SN have 105, 6, 171 and 21 connections to be tested, respectively). The first-level analysis was performed to define functional connectivity measures of each pair of ROIs for each subject. Then, still in the Conn toolbox, the second-level analysis was performed to compare functional connectivity between high- and low-creative potential people for the four functional networks by a Fisher test (*two-sided analysis, a Benjamin-Hochberg method false discovery rate-corrected p (p-FDR) ≤ 0.05*). We considered the cognitive data from the WM and analytic thought tasks as covariables of noninterest, in order to remove the signal explained by this variable from the second-level analysis.

Results

Cognitive profile

The measurement model was constructed from data including all the participants (N=45) and included three reflective constructs: WM, analytic thought, and creativity. The reliability and validity results are given in Table 2. The validity of the measurement model was assessed by internal consistency, convergent validity and discriminant validity. Internal consistency was calculated using the composite reliability of the items. The internal consistency measures, as indexed by the composite reliability, ranged approximately 0.80, exceeding the recommended threshold value of 0.70. The average variance extracted (AVE) scores for each construct and the outer loading of each indicator were examined and represented the convergent validity. Discriminant validity was evaluated by assessing the cross loading. The convergent validity was acceptable, as AVE was above 0.5 for all three constructs. Each item's factor loading was significant ($p < 0.05$, data not shown), and all but two were above 0.6.

As the validity of the measurement model was assured, we used an ascending hierarchical classification method to separate subjects, which provided 2 distinct clusters corresponding to group 1 (N=25, W/M= 14/11) and group 2 (N=20, W/M= 9/11) (Fig. 1). No significant differences were observed between the two groups in term of age, sex and education level (Table 3). Therefore, we did not use any of these variables as a co-factor for fMRI processing. When latent variable creativity scores were considered, the data showed that the two groups performed differently: group 1 (high-creative potential group) had a higher creative score than group 2 (low-creative potential group) (Fig. 2). Student's t-test computed on this latent variable score between the two groups yielded a significant effect of group ($t(43)=4.09$; $p < 0.0001$).

Regarding the structural model in the two groups, the quality of the relationships was measured by the R^2 metric, which reflects the level of the explained variance of the composites. The effect size f^2 and Stone-Geisser's Q^2 , assessing the model predictive power, were computed³⁹. In the high-creative potential group, the results showed that the model was statistically significant, $F=8.63$, $p=0.003$, with an R^2 value of 0.50, indicating that a substantial amount of the variance was explained. Both paths yielded a significant effect. WM showed a positive correlation, whereas analytic thought showed a negative correlation with creativity ($r= 0.403$; $p=0.014$ and $r= -0.535$; $p=0.003$, respectively) (Fig. 3a). The effect size of each path calculated through f^2 values revealed a high effect of both WM ($f^2=0.44$) and analytic thought ($f^2=0.69$) on creativity (Table 4). The model's predictive power (Q^2 index) for creativity was 0.19. In the low-creative potential group (Fig. 3b), the model was statistically significant, $F=6.74$, $p=0.005$, with substantial explained variance of $R^2= 0.38$. In this model, only analytic thought was significant, and it was negatively correlated with creativity ($r= -0.582$, $p=0.013$). The effect size of analytic thought calculated through f^2 values revealed a high effect ($f^2=0.33$) on creativity (Table 4). The model predictive power (Q^2 index) of creativity was low at 0.08.

The results of the multigroup t-test showed a significant difference between the high- and low-creative potential groups for the path coefficient related to WM and creativity ($t(43)=2.036$; $p=0.049$).

Functional connectivity

The functional connectivity analysis showed no differences in the ECN between the high-creative potential group and the low-creative potential group. However, significant changes in the AN, DMN and SN ($p\text{-FDR} < 0.05$) were identified (Fig. 4). In the AN (Fig. 4.a), the right intraparietal sulcus showed enhanced connectivity with the left inferior parietal gyrus ($t(33)=4.60$, $p\text{-FDR}=0.0011$), the left precuneus ($t(33)= 3.87$, $p\text{-FDR}= 0.0041$), the left middle temporal gyrus ($t(33)= 3.75$, $p\text{-FDR}=0.0041$), the right middle temporal gyrus ($t(33)= 3.47$, $p\text{-FDR}= 0.0067$), and the right inferior parietal gyrus ($t(33)= 2.94$, $p\text{-FDR}= 0.0217$). The right inferior parietal gyrus showed enhanced functional connectivity with the left middle frontal gyrus ($t(33)= 3.20$, $p\text{-FDR}= 0.0444$), the left precuneus ($t(33)=2.85$), $p\text{-FDR}= 0.0444$), the right superior temporal gyrus ($t(33)= 2.55$, $p\text{-FDR}= 0.0483$), the bilateral precuneus ($t(33)= 2.54$, $p\text{-FDR}= 0.0483$), and the left inferior parietal gyrus ($t(33)= 2.54$, $p\text{-FDR}=0.0483$). The right middle temporal gyrus showed enhanced functional connectivity with the bilateral precuneus ($t(33)= 4.04$, $p\text{-FDR}= 0.0054$), and the left middle frontal gyrus showed enhanced connectivity with the left superior frontal gyrus ($t(33)= 2.97$, $p\text{-FDR}= 0.0495$). In the DMN (Fig. 4.b), there was increased connectivity between the bilateral precuneus and the right inferior temporal gyrus ($t(33)=3.65$, $p\text{-FDR}=0.0124$). Finally, the SN (Fig. 4.c) showed decreased connectivity between the left lateral parietal gyrus and the right insula ($t(33)= -2.94$, $p\text{-FDR}= 0.0361$).

Discussion

The aim of this study is to show that by studying creative potential rather than studying creativity through a single measure of creativity, we can highlight the involvement of the AN, which is highly in line with the literature on creativity showing that attentional ability underpins creativity. This exploratory study allowed us to differentiate high- and low-creative potential subjects based on their cognitive functioning using PLS-SEM. To the best of our knowledge, this is the first time that such an approach has been used in this context. The model considered three latent variables: WM, analytical thinking and creativity. We have seen that for both groups, analytical thinking is negatively correlated with creativity, meaning that the more creative a person is, the worse its analytical thinking is. This result agrees with data from Nijstad and collaborators (2010)¹², showing that analytic thought makes it possible to find simple ideas linked to pre-existing concepts but does not lead to something original. In parallel, our cognitive results show that WM is positively correlated with creativity but only for the high-creative potential group. This result is in favor of the involvement of WM in the creative process, in line with the model of the dual pathway of creativity⁸. However, we also showed that in lower-creative potential people, no correlation exists between WM and creativity. This means that neither WM promotes nor hinders creativity. Thus, the relationship between WM and creativity is not linear. An explanation would be that WM will operate in

conjunction with another cognitive process that is not included in our model to foster creativity. Further studies will be necessary to confirm this assumption.

Regarding functional connectivity differences between high- and low-creative potential people, we observed enhanced connectivity in both the AN and the DMN. The more activated regions in the AN involved two nodes, the right intraparietal sulcus (Brodmann area (BA) 7) and the right inferior parietal gyrus (BA 39). These areas communicate more with regions in the left middle temporal gyrus (BA 21), left middle and superior frontal gyrus (BA 8 and BA 9, respectively), the bilateral and left precuneus (BA 7 and BA 31, respectively), the left inferior parietal gyrus (BA 40) and the right superior temporal gyrus (BA 22). All these areas are involved in creativity and particularly in insight^{14,42-45}. Moreover, the precuneus is primarily involved in the retrieval of semantic information from WM and particularly for insight processes⁴⁶. Notably, BA 7 and BA 21 also show increased connectivity in the DMN, which is associated with WM and insight^{47,48}. BA 7, which, in our study, is common to the AN and DMN in more creative people, is associated with object recognition by touch (stereognosis) and is a very important node in visual mental rotation^{49,50}. Moreover, BA 21 is involved in visual object recognition, and BA 39 is an associative area involved in perception, vision and reading. Interestingly, Mechelli (2004)⁵¹ showed, by comparing a visual perception task and a visual mental imaging task, that all these regions form the visual mental imaging network. This pattern of activation in creative people leads us to hypothesize that there is an active link between mental imagery, insight processes and WM.

Our results also showed modified functional connectivity within the SN for subjects with higher creative potential. There was decreased functional connectivity in the SN between the lateral parietal lobe (BA 39) and the right insula (BA 13). The latter structure is involved in insight⁵² and in many cognitive functions, especially decision making⁵³. Furthermore, given that the lateral parietal gyrus (BA 39) is involved in episodic memory recall⁵⁴ and that to make decisions, we must to base them on our lived experience⁵⁵, we think that this decrease in connectivity between these two structures, among people with greater creative potential, would imply that decision making is less dependent upon the person's past experiences which allows creative responses to emerge. This hypothesis is consistent with what⁵⁶ suggested; in particular, they said that to be original we need to inhibit what has already been done, what is common, in order to go for something new.

Taken together, our cognitive and functional connectivity results showing a positive correlation between WM and creativity, as well as greater functional connectivity within the AN and the DMN in high-creative potential people, suggest that these two networks are key points in creativity through WM processes involving mental imagery and insight processes. We have also highlighted decreased connectivity within the SN, suggesting a difference in the way decision making is done among high-creative potential people, namely, it is less dependent on their experience to obtain something new. Notably,

our results, although largely in line with the literature, stress the involvement of the AN in high-creative potential people, which is not commonly highlighted in other studies, and not the involvement of the ECN, which is usually emphasized. This circumstance can be explained by the fact that in the literature, high- and low-creative people are mainly distinguished on the basis of a single task (an alternative uses task or the remote associative task); consequently, the results for functional connectivity are related to functioning in these specific tasks, precluding characterization of the resting-state functional connectivity related to creative potential. Moreover, in this work, we used a cognitive functioning approach; thus, we think that the results of functional connectivity reflect a more comprehensive representation of creative potential. This interpretation is consistent with Riegel et al's statement (1966)⁵⁷ that reducing an interpretation of creativity to the lowest level of associative processes is not necessary. Furthermore, we think that when the subjects' differentiation was based on correlation of raw scores, such as in the literature, the focus was made on cognitive processes strictly necessary for the completion of the specific creative task. When the subjects' differentiation was approached by a cognitive functioning model based on the correlation of composite scores, as in our study, the focus was on cognitive processes underlying creative potential.

General conclusion and limitations

In conclusion, the results from this exploratory study clearly show that the classification of individuals as having high or low creative potential by highlighting different aspects of creativity is associated with specific features of resting-state brain functional connectivity, as described above. We believe that approaching the creativity levels of individuals through creative potential using a cognitive functioning model may be more relevant than previous methods of studying creativity and associated cerebral networks. Our results show that the AN and the DMN seem to be essential for creativity expression through WM processes involving mental imagery, a focus that has never been highlighted to date.

However, our results must be confirmed with a larger sample size in a future confirmatory study. Likewise, our cognitive model is limited and would require further elaboration to determine the relationships more accurately between mental imagery, WM, insight and creativity from both cognitive and functional viewpoints.

Reference

1. Lubart, T. I., Mouchiroud, C., Tordjman, S. & Zenasni, F. *Psychologie de la créativité (2e édition augmentée)*. (Paris: Armand Colin, 2003).
2. Bonnardel, N. Entrée: Créativité (pp. 95--97). *Dict. Sci. Cogn. Armand ColinVUEF* (2002).

3. Mednick, S. The associative basis of the creative process. *Psychol. Rev.* **69**, 220–232 (1962).
4. Mendelsohn, G. A. Associative and attentional processes in creative performance I. *J. Pers.* **44**, 341–369 (1976).
5. Abraham, A., Rutter, B., Bantini, T. & Hermann, C. Creative conceptual expansion: A combined fMRI replication and extension study to examine individual differences in creativity. *Neuropsychologia* **118**, 29–39 (2018).
6. Martindale, C. Creativity, primordial cognition, and personality. *Personal. Individ. Differ.* **43**, 1777–1785 (2007).
7. Miyake, A. *et al.* The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognit. Psychol.* **41**, 49–100 (2000).
8. De Dreu, C. K. W., Baas, M. & Nijstad, B. A. Hedonic tone and activation level in the mood-creativity link: Toward a dual pathway to creativity model. *J. Pers. Soc. Psychol.* **94**, 739–756 (2008).
9. Dietrich, A. The cognitive neuroscience of creativity. *Psychon. Bull. Rev.* **11**, 1011–1026 (2004).
10. Boden, M. A. Creativity and artificial intelligence. *Artif. Intell.* **103**, 347–356 (1998).
11. Ansburg, P. I. & Hill, K. Creative and analytic thinkers differ in their use of attentional resources. *Personal. Individ. Differ.* **34**, 1141–1152 (2003).
12. Nijstad, B. A., De Dreu, C. K. W., Rietzschel, E. F. & Baas, M. The dual pathway to creativity model: Creative ideation as a function of flexibility and persistence. *Eur. Rev. Soc. Psychol.* **21**, 34–77 (2010).
13. Benedek, M., Jurisch, J., Koschutnig, K., Fink, A. & Beaty, R. E. Elements of creative thought: Investigating the cognitive and neural correlates of association and bi-association processes. *NeuroImage* **210**, 10 (2020).
14. Pidgeon, L. M. *et al.* Functional neuroimaging of visual creativity: a systematic review and meta-analysis. *Brain Behav.* **6**, e00540 (2016).
15. Rominger, C. *et al.* Functional coupling of brain networks during creative idea generation and elaboration in the figural domain. *NeuroImage* **207**, 1–7 (2020).
16. Sagar, M. *et al.* Changes in Brain Activation Associated with Spontaneous Improvisation and Figural Creativity After Design-Thinking-Based Training: A Longitudinal fMRI Study. *Cereb. Cortex* **27**, 3542–3552 (2017).
17. Stevens, C. E. & Zabelina, D. L. Creativity comes in waves: an EEG-focused exploration of the creative brain. *Curr. Opin. Behav. Sci.* **27**, 154–162 (2019).
18. Takeuchi, H. *et al.* Convergent creative thinking performance is associated with white matter structures: Evidence from a large sample study. *NeuroImage* **210**, 9 (2020).
19. Zhang, W., Sjoerds, Z. & Hommel, B. Metacontrol of human creativity: The neurocognitive mechanisms of convergent and divergent thinking. *NeuroImage* **210**, 116572 (2020).
20. Beaty, R. E., Seli, P. & Schacter, D. L. Network neuroscience of creative cognition: mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain. *Curr. Opin. Behav. Sci.* **27**, 22–30 (2019).

21. Beaty, R. E. *et al.* Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **115**, 1087–1092 (2018).
22. Belden, A. *et al.* Improvising at rest: Differentiating jazz and classical music training with resting state functional connectivity. *NeuroImage* **207**, 116384 (2020).
23. Cousijn, J., Zanolie, K., Munsters, R. J. M., Kleibeuker, S. W. & Crone, E. A. The Relation between Resting State Connectivity and Creativity in Adolescents before and after Training. *PLoS ONE* **9**, e105780 (2014).
24. Feng, Q. *et al.* Verbal Creativity Is Correlated With the Dynamic Reconfiguration of Brain Networks in the Resting State. *Front. Psychol.* **10**, 894 (2019).
25. Kenett, Y. N., Betzel, R. F. & Beaty, R. E. Community structure of the creative brain at rest. *NeuroImage* **210**, 1–9 (2020).
26. Schuler, A.-L. *et al.* Modulations in resting state networks of subcortical structures linked to creativity. *NeuroImage* **195**, 311–319 (2019).
27. Allen, E. A. *et al.* A Baseline for the Multivariate Comparison of Resting-State Networks. *Front. Syst. Neurosci.* **5**, 23 (2011).
28. Raichle, M. E. The Restless Brain. *Brain Connect.* **1**, 3–12 (2011).
29. Zhang, D. & Raichle, M. E. Disease and the brain’s dark energy. *Nat. Rev. Neurol.* **6**, 15–28 (2010).
30. Beaty, R. E. *et al.* Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia* **64**, 92–98 (2014).
31. Beaty, R. E. *et al.* Brain networks of the imaginative mind: Dynamic functional connectivity of default and cognitive control networks relates to openness to experience. *Hum. Brain Mapp.* **39**, 811–821 (2018).
32. Torrance, E. P. *Torrance Tests of Creative Thinking: Streamlined scoring guide for figural forms A and B.* (Scholastic Testing Service, 2017).
33. Torrance, E. P. *Torrance Tests of Creative Thinking: Norms-technical manual verbal forms A and B.* (Scholastic Testing Service, 2008).
34. Zimmermann, P. & Fimm, B. Tests d’évaluation de l’attention (TEA). *Würselen Psytest* (1994).
35. Bollen, K. & Lennox, R. Conventional wisdom on measurement: A structural equation perspective. *Psychol. Bull.* **110**, 305–314 (1991).
36. Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M. & Sarstedt, M. *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLSSEM).* (Sage, 2014).
37. Paban, V., Deshayes, C., Ferrer, M.-H., Weill, A. & Alescio-Lautier, B. Resting Brain Functional Networks and Trait Coping. *Brain Connect.* **8**, 475–486 (2018).

38. Haenlein, M. & Kaplan, A. M. A Beginner's Guide to Partial Least Squares Analysis. *Underst. Stat.* **3**, 283–297 (2004).
39. Riou, J., Guyon, H. & Falissard, B. An introduction to the partial least squares approach to structural equation modelling: a method for exploratory psychiatric research: PLS-SEM in Psychiatric Research. *Int. J. Methods Psychiatr. Res.* **25**, 220–231 (2016).
40. Goles, T. & Chin, W. W. Information systems outsourcing relationship factors: detailed conceptualization and initial evidence. *Acm Sigmis Database* 36, 47-67. *Acm Sigmis Database* **36**, 47–67 (2005).
41. Behzadi, Y., Restom, K., Liau, J. & Liu, T. T. A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI. *NeuroImage* **37**, 90–101 (2007).
42. Barbey, A. K., Colom, R. & Grafman, J. Architecture of cognitive flexibility revealed by lesion mapping. *NeuroImage* **82**, 547–554 (2013).
43. Ding, X. *et al.* Short-term meditation modulates brain activity of insight evoked with solution cue. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* **10**, 43–49 (2015).
44. Tik, M. *et al.* Ultra-high-field fMRI insights on insight: Neural correlates of the Aha!-moment. *Hum. Brain Mapp.* **39**, 3241–3252 (2018).
45. Wu, X., Jung, R. E. & Zhang, H. Neural underpinnings of divergent production of rules in numerical analogical reasoning. *Biol. Psychol.* **117**, 170–178 (2016).
46. Cavanna, A. E. & Trimble, M. R. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain* **129**, 564–583 (2006).
47. Ogawa, T., Aihara, T., Shimokawa, T. & Yamashita, O. Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses. *Sci. Rep.* **8**, 1–11 (2018).
48. Takeuchi, H. *et al.* The Association between Resting Functional Connectivity and Creativity. *Cereb. Cortex* **22**, 2921–2929 (2012).
49. Harris, I. M. *et al.* Selective right parietal lobe activation during mental rotation. *Brain* **123**, 65–73 (2000).
50. Podzbenko, K., Egan, G. F. & Watson, J. D. G. Real and Imaginary Rotary Motion Processing: Functional Parcellation of the Human Parietal Lobe Revealed by fMRI. *J. Cogn. Neurosci.* **17**, 24–36 (2005).
51. Mechelli, A. Where Bottom-up Meets Top-down: Neuronal Interactions during Perception and Imagery. *Cereb. Cortex* **14**, 1256–1265 (2004).
52. Shen, W. *et al.* Is creative insight task-specific? A coordinate-based meta-analysis of neuroimaging studies on insightful problem solving. *Int. J. Psychophysiol.* **110**, 81–90 (2016).
53. Uddin, L. Q., Nomi, J. S., Hébert-Seropian, B., Ghaziri, J. & Boucher, O. Structure and Function of the Human Insula: *J. Clin. Neurophysiol.* **34**, 300–306 (2017).

54. Benedek, M. *et al.* Creating metaphors: The neural basis of figurative language production. *NeuroImage* **90**, 99–106 (2014).
55. Madore, K. P., Addis, D. R. & Schacter, D. L. Creativity and Memory: Effects of an Episodic-Specificity Induction on Divergent Thinking. *Psychol. Sci.* **26**, 1461–1468 (2015).
56. Gupta, N., Jang, Y., Mednick, S. C. & Huber, D. E. The Road Not Taken: Creative Solutions Require Avoidance of High-Frequency Responses. *Psychol. Sci.* **23**, 288–294 (2012).
57. Riegel, K. F., Riegel, R. M. & Levine, R. S. An analysis of associative behavior and creativity. *J. Pers. Soc. Psychol.* **4**, 50–56 (1966).

Table 1 Regions of interest coordinates

Region	Laterality	BA	x	y	z
DMN					
inferior parietal gyrus	L	BA 39	-46	-66	30
Inferior parietal gyrus	R	BA39	49	-63	33
Inferior temporal gyrus	L	BA21	-61	-24	-9
Inferior temporal gyrus	R	BA21	58	-24	-9
Medial dorsal thalamus	Bi- lateral	BA50	0	-12	9
Precuneus	Bi- lateral	BA7	1	-64	43
Posterior cingulate cortex	Bi lateral	BA23	0	-52	22
Angular gyrus	L	BA 39	-43	-69	33
Angular gyrus	R	BA39	47	-66	32
Anterior cingulate cortex	Bi- lateral	BA32	0	41	4
Middle cingulate cortex	Bi- lateral	BA32	0	21	40
Medial frontal gyrus	Bi- lateral	BA10	-1	45	-9
Inferior frontal gyrus	R	BA47	32	22	-15
Middle frontal gyrus	R	BA8	26	33	41
Middle frontal gyrus	L	BA8	-26	26	42
ECN					
Dorsal medial PFC	Bi- lateral	BA8	0	24	46
Anterior PFC	L	BA6	-44	45	0
Anterior PFC	R	BA6	44	45	0
Superior Parietal	L	BA39	-50	-51	45
AN					
Cingulate gyrus	Bi-lateral	BA 32	0	22	45
Inferior parietal gyrus	L	BA40	-47	-57	39
Inferior parietal gyrus	R	BA 39	42	-56	42
Intra- parietal sulcus	R	BA 7	27	-65	44
Middle frontal gyrus	L	BA 8	-27	24	49
Middle frontal gyrus	R	BA 8	34	24	44
Inferior frontal gyrus	L	BA 45	-43	24	21
Superior frontal gyrus	L	BA 9	-32	38	39
Superior frontal gyrus	R	BA 9	33	39	35
Precuneus	L	BA 31	-6	-52	37
Precuneus	Bi-lateral	BA 7	0	-53	61
Middle temporal gyrus	L	BA 21	-62	-37	-12
Middle temporal gyrus	R	BA 21	64	-39	-11
Superior temporal gyrus	L	BA 22	-56	-48	-18
Superior temporal gyrus	R	BA 22	57	-44	11
Angular gyrus	L	BA 39	-33	-64	-31
Precentral gyrus	R	BA 6	51	2	50
Insula	L	BA13	-46	15	-5
Insula	R	BA 13	45	18	-6
SN					
Dorsal anterior cingulate	Bi- lateral	BA32	0	21	36
Anterior PFC	L	BA10	-35	45	30
Anterior PFC	R	BA9	32	45	30
Insula	L	BA13	-41	-3	6
Insula	R	BA13	41	3	6
Lateral parietal gyrus	L	BA39	-62	-45	30
Lateral parietal gyrus	R	BA39	62	-45	30

Table 2 Assessment of the measurement model: internal consistency (composite reliability), convergent validity (loading and AVE), and discriminant validity (cross loading). Items in bold represent loadings >0.50 threshold.

Latent variables	Composite reliability	Indicators	Outer loadings and cross loadings			AVE
			WM	Analytic Though	Creativity	
WM	0.84	SA task				0.52
		Running times 0-5 min	0.86	0.07	-0.18	
		% correct answers 0-5 min	0.56	0.45	-0.14	
		Running times 5-10 min	0.77	-0.04	-0.12	
		% correct answers 5-10 min	0.54	0.49	-0.06	
		Running times 10-15 min	0.81	0.09	-0.12	
Analytic though	0.78	Luria				0.50
		% Correct answers	0.32	0.71	-0.30	
		Hanoi				
		Running times level 1	0.32	0.62	-0.21	
		Running times level 2	0.14	0.70	-0.12	
		Running times level 4	0.19	0.63	-0.14	
Creativity	0.82	TTCT figurative				0.66
		fluency	0.22	-0.29	0.95	
		flexibility	0.31	-0.36	0.91	
		originality	0.14	-0.23	0.91	
		TTCT verbal				
		fluency	0.31	0.14	0.61	
		originality	0.22	-0.14	0.62	

Table 3 Effects of age, years of education and gender (0 for men and 1 for women) between the two groups.

	Age		Years of education		Gender	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
High Creative potential (Group 1)	36,08	8,18	15,28	3,46	0,56	0,51
Low Creative potential (Group 2)	31,6	10,47	13,65	1,95	0,45	0,51
T-Test	0,11		0,053		0,47	

Table 4 Effect size of the structural model paths.

Paths	f ²	Magnitude of the effect
Model of High creative potential group		
Working Memory on Creativity	0.44	High
Analytic though on Creativity	0.69	Substantial
Model of Low creative potential group		
Working Memory on Creativity	0.07	Low
Analytic though on Creativity	0.33	High

Figure Captions

Fig. 1 Dendrogram of the hierarchical clustering tree. We clustered the subjects in two groups based on their cognitive results on the PLS-SEM with Ward's aggregation method.

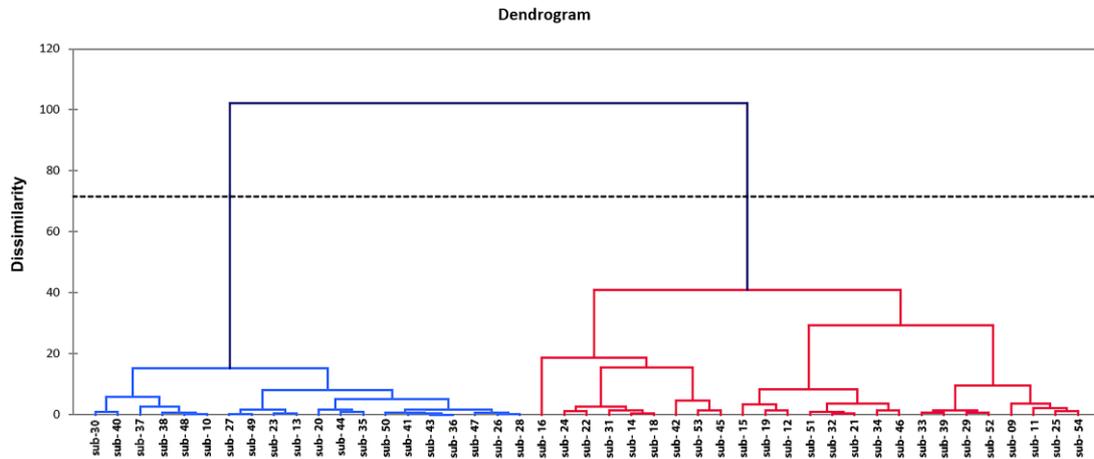


Fig. 2 Mean composite creative scores for the low-creative potential group (left) and high-creative potential group (right).

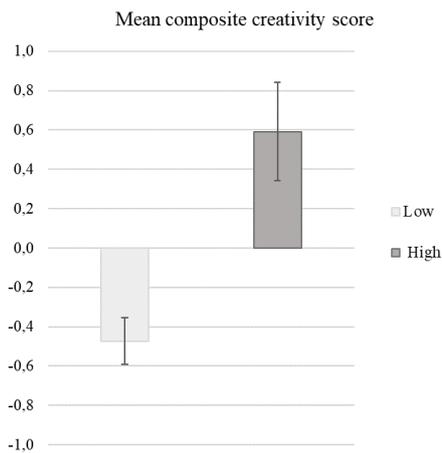
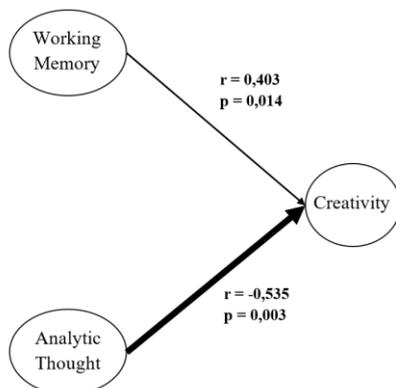


Fig. 3 Structural model of the direct effects of working memory, analytic thought, and creativity. a) High-creative potential group; b) low-creative potential group. Big row shows highly significant correlations, normal row shows significant correlations and discontinuing row for nonsignificant correlations.

3.a)



3.b)

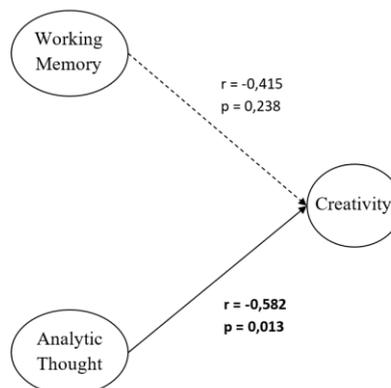
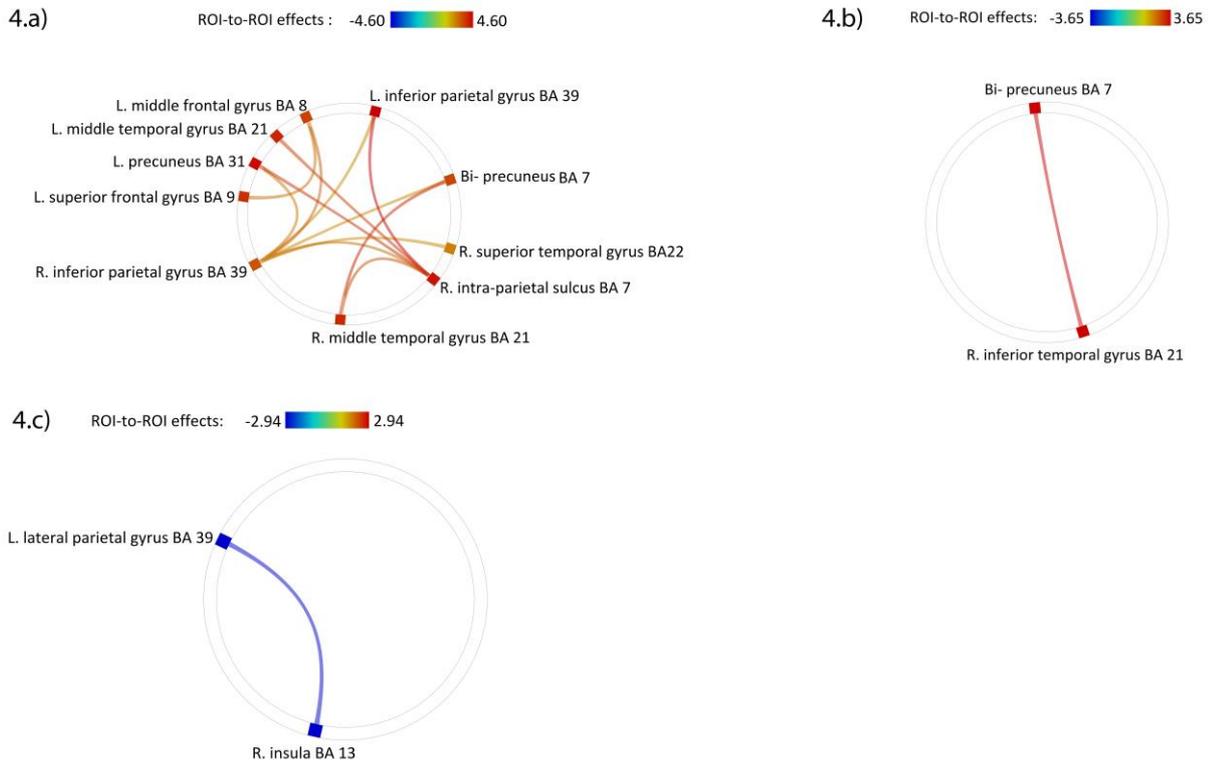


Fig. 4 Contrast of functional connectivity between the high and the low creative people (high creative potential > low creative potential). a) Attentional network; b) default mode network; c) salience network. Red lines represent positive correlations and blue lines correspond to negative correlations. The degree of red or blue corresponds to the correlation level.



Problem-solving training modifies cognitive functioning and related functional connectivity in healthy adults

Alescio-Lautier B., Chambon C., Deshayes C., Anton J.L., Escoffier G., Ferrer M.H., Paban V.

Article soumis à *Neuropsychologia*

Nos capacités cognitives évoluent au cours de la vie, et peuvent être améliorées par une pratique régulière. Nous avons examiné ici les effets d'un programme d'entraînement cognitif basé sur la résolution de problèmes fermés complexes, sur la pensée innovante. Notre hypothèse sous-jacente était qu'un tel entraînement améliorerait la pensée innovante en changeant la façon dont les processus exécutifs, tels que l'inhibition, la flexibilité mentale et le raisonnement, sont impliqués.

Méthode : Nous avons réparti nos sujets en trois groupes, un groupe contrôle sans entraînement, un groupe entraîné avec des mots-croisés et un groupe entraîné en résolution de problèmes. Afin d'évaluer le fonctionnement cognitif des sujets nous avons construit un modèle cognitif grâce à la SEM-PLS, qui suppose l'influence de l'inhibition, la flexibilité cognitive et le raisonnement sur la pensée innovante. Ensuite, nous avons évalué les effets de l'entraînement sur la connectivité fonctionnelle de repos.

Résultats : Alors que ce sont les capacités de raisonnement qui influence la pensée innovante chez les groupes contrôle et entraîné avec les mots croisés, c'est la flexibilité cognitive qui l'influence chez le groupe entraîné avec la résolution de problèmes. Cela se traduit chez ce dernier groupe par une augmentation de la connectivité au sein du réseau attentionnel (AN) et du réseau visuel (VN). Une analyse en théorie des graphes a révélé 1) une augmentation du nombre de connections et de l'efficacité globale dans le precuneus droit (réseau par défaut, DMN) ; et 2) une augmentation de l'efficacité locale dans le gyrus lingual gauche (VN) et le lobe insulaire droit (AN).

Discussion : Ces résultats mettent en lumière qu'un entraînement en résolution de problème promeut la pensée innovante en modifiant la façon dont les sujets recrutent et utilisent les processus cognitifs nécessaires pour faire face à la demande. Ce changement est sous-tendu par des modifications du fonctionnement cérébral de repos impliqués dans la créativité.

Problem-solving training modifies cognitive functioning and related functional connectivity in healthy adults

Béatrice Alescio-Lautier ^{a*1}, Caroline Chambon ^{a1}, Claire Deshayes ^a, Jean-Luc Anton ^b, Guy Escoffier ^c Marie-Hélène Ferrer ^d, Véronique Paban ^a

^a Aix Marseille Univ, CNRS, LNSC, Marseille France ; UMR-CNRS 7260 ; FR3C FR 3512, 3 Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France

^b Aix Marseille Université, CNRS, Centre IRM-INT@CERIMED, Institut de Neurosciences de la Timone ; UMR7289 CNRS & AMU ; Faculté de Médecine de la Timone ; 27 Bd Jean Moulin ; 13005 Marseille

^c Aix Marseille Univ, Institut de Neurophysiopathologie (INP), CNRS, UMR 7051, Equipe Neurobiologie des processus Mnésiques (NPM), 3 Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France

^d Département Neurosciences et Contraintes Opérationnelles (NCO), Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA) 91223 Brétigny-sur-Orge, Cedex, France

***Corresponding author at:**

Laboratoire de Neurosciences Sensorielles et Cognitives – UMR 7260, Aix Marseille Univ & Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Centre Saint-Charles, Fédération de Recherche 3C – Case B, 3, Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France Tel: +33 (0) 413 550 883.

E-mail: Beatrice.alescio-lautier@univ-amu.fr

¹ Béatrice Alescio-Lautier and Caroline Chambon contributed equally to the present study

Abbreviations:

AVE: Average Variance Extracted, PLS-SEM: Partial least squares variance-based structural equation modeling, ICA: independent component analysis, FDR: false discovery rate, ICs: independent components.

Abstract

Cognitive functioning evolves throughout life. The regular practice of stimulating activities maintains or even strengthens cognitive skills. To improve a subject's ability to cope with the difficulties of everyday life, new cognitive interventions have been explored, with research developing new and creative solutions. In this study, we investigated the effects of a cognitive training program based on complex closed-ended problem-solving, on innovative thinking. Our underlying assumption was that problem-solving training would improve innovative thinking by changing the way executive processes, such as inhibition, attentional flexibility, and reasoning are involved. To this end, we first evaluated in 83 healthy adults using partial least squares variance-based structural equation modeling how inhibition, cognitive flexibility, and reasoning were related to the distinct dimensions of innovative thinking. Second, we assessed how these interactions were modified with cognitive training based on problem-solving in a subgroup of 16 subjects compared to cognitive training based on crossword-solving in another subgroup of 15 subjects. Third, in a pilot fMRI study, we evaluated in subjects trained with problem-solving changes in brain networks at rest as a result of training. Data analyses of cognitive measures showed that innovative thinking was influenced by reasoning in subjects without cognitive training whereas it was influenced by cognitive flexibility following problem-solving training. Functional connectivity analyses between before and after problem-solving training revealed significant changes in attention networks (increased functional connectivity between the right inferior frontal gyrus and the left fusiform gyrus) and in visual networks (increased functional connectivity between the left middle occipital gyrus and the left lingual and middle temporal gyri). Graph theoretical analyses revealed that after problem-solving training, participants demonstrated an increased degree and global efficiency in the right precuneus, which belongs to the default mode network. Increased local efficiency was also found in the left lingual gyrus, which belongs to the visual network, and the left insular lobe, which belongs to the attention network. These findings highlight that a cognitive intervention based on complex closed-ended problem solving promotes innovative thinking by changing the way subjects recruit and use relevant cognitive processes to cope with demand. This change is underpinned by modifications in the resting-state regional connectivity of brain networks that are involved in creative processes.

Keywords

Problem-solving training, Flexibility, Innovative thinking, Resting state, Graph theory

1. Introduction

Cognitive functioning evolves throughout life. The regular practice of stimulating activities is thought to maintain, or even reinforce, cognitive abilities. Studies have shown long-term effects in participants after cognitive training (Schaie, 1996, 2004); however, different cognitive and personality profiles coexist. To promote improvements and the beneficial effects of skills, these different profiles must be considered during cognitive training (Schaie, 1994). Hence, stimulating activities must be customized to the subject to be effective. Many studies have assessed the extent to which cognitive training can increase or restore functions, as well as propel an individual beyond their norms. Distinct types of training improve cognitive functioning, and some programs based on attention exercises have shown that attentional training reinforces the neural networks of control processes (Raz and Buhle, 2006). Many programs also target working memory and demonstrate the facilitation of cognitive functioning (Westerberg et al., 2007). Moreover, Hussey and Novick (2012) stipulated that the training of executive functions induces a benefit for language processes.

Many studies report improved cognitive functioning in healthy older adults or slower declines in individuals with mild cognitive impairment after cognitive interventions (Lustig et al., 2009; Gates and Valenzuela, 2010; Kurtz et al., 2011). In previous studies, we reported that a multifactorial cognitive training program targeting consciously controlled processes at encoding had a positive effect on cognition in healthy older adults (Chambon et al., 2014; Chambon and Alescio-Lautier, 2019), in individuals with mild cognitive impairment (Herrera et al., 2012) and in individuals with early stage of Alzheimer's disease (Alescio-Lautier et al., 2019). Although such work demonstrates positive effects, the facilitation of the transfer of training benefits to everyday situations can be improved, such as ensuring that a person can find solutions to the various problems usually encountered throughout the day. New cognitive

interventions to help people with the demands of daily life remain unexplored. To help people cope with the difficulties of everyday life, it is necessary to find alternative interventions. In this sense, creativity could be life-saving by providing individuals with additional resources to solve complex and novel situations. Therefore, in addition to training to improve cognitive functioning, trainings that stimulate creativity have grown and are of great interest (Vally et al., 2019; Meinel et al., 2019; Puccio et al, 2020). Creativity has many facets and creativity training is based on a variety of approaches (Scott et al., 2004). Idea generation training is undoubtedly the most used approach (Clapham, 1997; Baruah and Paulus, 2008). However, other approaches such as training creative processes, conceptual combination and critical thinking have also been used and are equally effective (Murdock et al, 1993, Puccio et al., 2020).

Numerous studies have highlighted the importance of executive engagement and cognitive control during creative thinking as assessed by divergent thought tasks (Benedek et al., 2014). In this study, we wanted to situate our intervention ahead of creative thinking, i.e. to act on executive processes that will generate creative thinking. We believe that a focus on executive mechanisms that support creative thinking and on executive strategies could promote its use in a variety of contexts. To achieve this goal, we propose a cognitive intervention based on problem solving which could foster the ability to depart from the usual constraints and promote cognitive attributes, such as nonjudgment, willingness, and plasticity that enable one to think differently and engage more fully in everyday life. In addition, this type of cognitive intervention could be successful in creating a conscious relationship between cognitive improvements and the ability to make everyday life problems easier to solve, which may ultimately change the recruitment and use of relevant cognitive processes to cope with demands.

Conventionally, a problem arises if we have a goal but do not know how to reach it. Hence, solving problems implies procedures that are generally not known and are therefore new to the subject (Wimmer, 2016). Frame-breaking insight is often required to find novel solutions.

Often, individuals do not find solutions because frame breaking involves the implementation of a series of innovative heuristics and tools (Ness, 2015). Convergent and divergent thinking are both involved in effective novelty (Guilford, 1967). Specifically, divergent thinking involves new idea generation, a variety of approaches, and the ability to transform information to create new prospects and turn challenges into opportunities. Convergent thinking involves evaluating novelty and looking for accurate stored information, which enables one to choose the best answer (Cropley, 2006). During problem solving, convergent thinking makes it possible to explore, evaluate, or criticize the variability generated by divergent thinking and identify its effective aspects. This interplay between divergent and convergent thinking during problem solving fosters the flexible engagement of numerous cognitive processes, such as the focus and defocus of attention and inhibition, respectively. Regarding inhibition, studies have shown that inhibitory control support creativity (Stavridou and Furnham, 1996; Takeuchi et al., 2011; Radel et al., 2015; Cassoti et al., 2016). Thus, we believe that problem-solving training using appropriate instructions and specific problems that promote frame breaking, and alternatively involve convergent and divergent thinking, should improve the ability of individuals to solve problems by improving innovative thinking. The work of Tik et al. (2018) showing that the remote associates test that requires both divergent and convergent thinking to provide insightful solutions supports our assumption.

In light of all of these data, we investigated the effects of a cognitive training program based on problem solving, on innovative thinking. Our underlying assumption was that problem-solving training would improve innovative thinking by changing the way executive processes, such as inhibition, attentional flexibility, and reasoning are involved. In order to evaluate this assumption, we used a sample of cognitively typical adults in a first study to identify how inhibition, cognitive flexibility, and reasoning were related to the distinct dimensions of innovative thinking. In a second study, we assessed how these interactions were

modified with cognitive training based on problem solving and, in a third fMRI pilot study, whether this training could induce changes in brain networks at rest. We believe that the study of brain connectivity at rest may be useful to highlight changes in functional connectivity after cognitive training. Indeed, studies reported training-related brain-state changes at rest, indicating greater connectivity in the default mode network DMN and the central executive network (Chapman et al., 2015; Cao et al., 2016). Interestingly, the increase in subjects' creative performance after repeated exposure to creative tasks is accompanied by changes in resting state connectivity. Indeed, Fink et al (2018) report modulation of functional connectivity in the DMN, the sensorimotor network (SMN), the auditory network (AUN), and the attention network (AN). Training must be long enough to allow for these brain changes. Thus, for these authors, as exposures occur, the subject will refine his strategy until his potential is fully optimized, which will lead to changes in brain structure. These modifications could reflect permanent changes in the brain assessed by resting state functional connectivity.

2. Experiment 1: Innovative thinking and executive mechanisms

2.1. Materials and methods

2.1.1. Participants

We recruited 83 healthy subjects between 20 and 40 years of age (age means \pm SD = 26.51 ± 2.73 years, M/W=36/47). Participants were students and staff at Aix-Marseille University who were recruited through advertisements and received monetary compensation for their participation in the study. They had no history of neurological or psychiatric illness. All the participants provided written, informed consent in accordance with procedures approved by the local ethics committee, which followed the recommendations of the Declaration of Helsinki.

2.1.2. Cognitive tasks

According to our hypothesis problem-solving training would improve innovative thinking by changing the way executive processes, such as inhibition, cognitive flexibility, and reasoning are involved.

Hence, to assess inhibition, we administered the *Stroop test* (Golden, 1978), which is a classic measure of cognitive inhibition. The time (in seconds) required to complete each test was used for cognitive analyses.

To assess cognitive flexibility, we administered an *attention task* that was developed in our laboratory and described previously (Herrera et al., 2012; Chambon et al., 2014; 2019). Firstly, the participant has to remember a target picture presented in the centre of the screen. Then, two pictures (50% target, 50% lures) appeared at the same time on the left and the right side of the screen. The task includes 4 variants but, in this study, participants performed the variant 3 and 4. In Variant 3 and for the first trial, one of the two pictures was pointed to by a green arrow. The participants had to respond if the picture pointed to by the arrow was the target picture or not by pressing a key “enter” to answer “yes, it is the target,” and on the key “esc” to answer “no, it is not the target. They were instructed to ignore pictures that were not pointed to by the arrow even if they were the target picture and to respond as fast and as accurately as possible. Starting the second trial, the arrow appeared only to indicate a change of side. Thus, when the green arrow disappeared, the participant must remember the side where the arrow was last to know and to continue to answer on the same side of the screen, until a new arrow appeared. This variant is based on focalized attention, flexibility and short-term memory. In variant 4, the first time again the green arrow shows the side of interest. But afterwards a red star appears and shows the side where the participant has to pay attention to the next two following images. In addition to the above mechanisms, this variant is based on shared

attention. Each variant includes 80 trials. We determined the percentage of correct responses and mean response time (seconds).

To assess reasoning, we administered a computerized modified version of the *Wisconsin Card Sorting Test* according to the *Wisconsin Card Sorting Test* manual (Heaton et al., 1993). This test assesses reasoning abilities, which involve cognitive flexibility or set-shifting, and cognitive strategy modification abilities. This test was scored, in percentages, by the total number of correct answers, erroneous answers, perseverative errors, and non-perseverative errors. We used also a computerized modified version of the *Tower of London test*. In this computerized version, all displacements must be imagined before an answer is given. In other words, the subjects answered by providing the minimum number of displacements required to reach the target configuration and did not to execute the task physically, as is the case in the manual version. The test consisted of the following steps. The participants observed two configurations of three stacked, colored balls (blue, red, and yellow) placed in three holes; the top configuration represented the starting configuration, and the bottom configuration, the target configuration. From left to right, the first hole could only receive one ball, the second could receive two balls, and the third could receive three balls. The participant was asked to choose, between 1 and 5 movements, to find the minimum number of displacements required to move from the starting configuration to the target configuration, by clicking with a computer mouse on one of the numbers proposed on the screen. The rules of displacement were as follows: 1) one single ball could be moved at a time; 2) the moved ball must be on top of the stack; and 3) the moved ball could only be placed in an empty hole or on other balls. The subject performed 10 trials per number of movements, for a total of 50 trials, without a time limit. The *Tower of London* test is based on reasoning abilities that involve planning, shifting and visuospatial working memory. This test was scored by the correct responses and the time (in msec) taken to complete each trial.

To assess innovative thinking, we used the *Revised Minnesota Paper Form Board Test* (Likert and Quasha, 1941), which Muchinsky (2004) reports involves “imagery capacity, spatial observation, mental visualization skills, art and relational skills, and the ability for an individual to visualize and manipulate objects in space”. We were interested in the number of correct responses, to which we subtracted 1/5th from the number of wrong answers. Finally, the subjects were asked to solve four *insight* (Schooler et al., 1993; problems number 1, 3, 4, and 7 described in Appendix A) and four *non-insight problems* (Schooler et al., 1993; problems number 1, 2, 3, and 4, described in Appendix B). The dependent measure was the total number of problems (in percent) resolved correctly within the 4-minute time period allotted for each subject. To resolve the problems in a timely manner, subjects were required to use abilities such as willingness to challenge convention. Resolving non-insight problems required the use of conventional research strategies involving logic, recognition and decision making, while resolving insight problems required a prelinguistic form of intuitive cognition (the nonverbal and nonlogical basis for imaginative tools).

2.2.3. Data analysis

Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) was used to analyze the cognitive measures. PLS-SEM is an advanced statistical method based on exploratory techniques (Bollen and Lennox, 1991) that performs adequately with small sample sizes (Hair et al., 2014). PLS-SEM first analyzes the measurement model elaborated from indicator variables and then examines the structural model created from latent variables (or constructs). The relationships between constructs are represented by a diagram, in which circles represent constructs, and arrows represent relationships. The path model is translated into a set of equations describing a measurement model and a structural model (Haenlein and Kaplan, 2004). The validity of the measurement model was assessed by internal consistency, convergent

validity and discriminant validity. Internal consistency was calculated using the composite reliability of the items. The average variance extracted (AVE) scores for each construct and the outer loading of each indicator were examined and represented the convergent validity. Discriminant validity was evaluated by assessing the cross loading. Regarding the structural model, the quality of the relationships was measured by the R^2 metric, which reflects the level of the explained variance of the composites. The effect size f^2 were computed (Riou et al., 2016). Statistical comparisons of path coefficients among the groups of subjects (reference, crossword, and problem-solving training groups) were performed using XLSTAT software, which offers multigroup comparison methods in the framework of PLS path modeling presented by Goles and Chin (2005). An adapted t-test based on bootstrapped standard errors was used. Statistical significance was set at $p \leq 0.05$.

2.2. Results

The measurement model was constructed from data that included all the participant (N=83) and four reflective constructs: inhibition, reasoning, cognitive flexibility, and innovative thinking. The reliability and validity results are shown in Table 1. The internal consistency measures, as indexed by the composite reliability, ranged from 0.78 to 0.95, exceeding the recommended threshold value of 0.70. The convergent validity was acceptable, as AVE was above 0.5 for all four constructs. Each item's factor loading was significant ($p < 0.05$, data not shown), and all but two were above 0.6.

Constructs	Composite reliability	Indicators	Outer loadings and cross loadings				AVE
			Inhibition	Cognitive flexibility	Reasoning	Innovative thinking	
Inhibition	0.904						0.751
		Stroop, Color naming	0.930	0.044	0.392	-0.303	
		Stroop, Color name reading	0.760	0.042	0.172	-0.132	
		Stroop, Interference	0.899	0.031	0.274	-0.281	
Reasoning	0.855						0.551
		Wisconsin, number of erroneous answers	0.261	0.094	0.904	-0.442	
		Wisconsin, perseverative errors	0.290	0.127	0.725	-0.307	
		Wisconsin, non-perseverative errors	0.233	0.075	0.893	-0.419	
		Tower of London test, 3 moves, time	0.287	0.208	0.591	-0.352	
		Tower of London test, 4 moves, time	0.243	0.207	0.516	-0.167	
Cognitive flexibility	0.947						
		Visuospatial focused attention test, Variant 3, time	0.045	0.941	0.119	-0.233	0.899
		Visuospatial focused attention test, Variant 4, time	0.038	0.954	0.199	-0.263	
Innovative thinking	0.785						0.546
		Minnesota test	-0.404	-0.081	-0.303	0.690	
		Insight problems	-0.128	-0.159	-0.292	0.690	
		Noninsight problems	-0.140	-0.309	-0.441	0.828	

Table 1. Assessment of the measurement model: internal consistency (composite reliability), convergent validity (loading and average variance extracted (AVE)), and discriminant validity (cross loading)

As the validity of the measurement model was assured, we proceeded to the assessment of the results of the structural model. The results showed that the model was statistically significant, $F=9.89$, $p=0.0003$, with an R^2 value of 0.38, indicating that a substantial amount of the variance was explained. All the paths showed positive correlations, but only the relationship between reasoning and innovative thinking was significant ($\beta=0.546$; $p<0.001$) (Fig. 1).

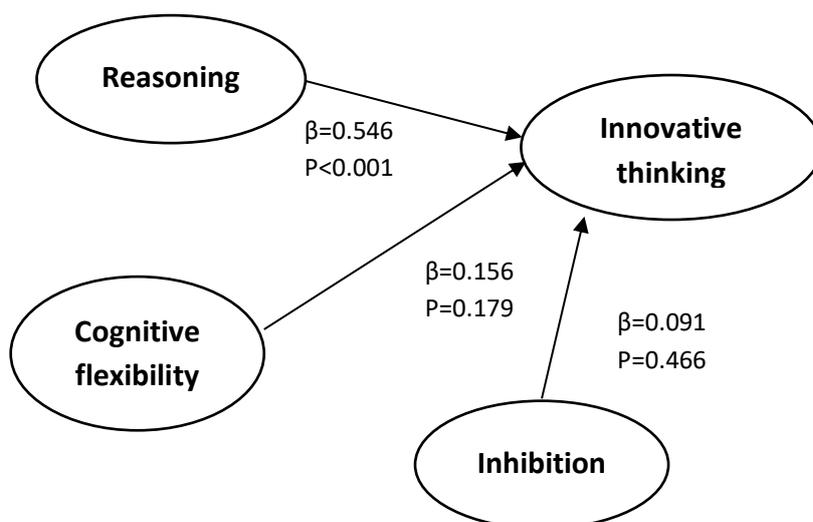


Fig. 1: Structural model of the direct effects of reasoning, cognitive flexibility, and inhibition on innovative thinking in 83 healthy subjects.

The effect size of each path, calculated through f^2 values, confirmed these data, showing a strong effect of reasoning on innovative thinking ($f^2=0.40$) and a weak effect of the other 2 paths ($f^2\leq 0.04$) (Table 2).

Paths	f2	Magnitude of the effect
<i>Model of healthy subjects' group</i>		
Reasoning on Innovative thinking	0.40	High
Cognitive flexibility on Innovative thinking	0.04	Low
Inhibition on Innovative thinking	0.01	Low

Table 2. Effects sizes of the structural model paths.

3. Experiment 2: problem solving training

3.1. Methods

3.1.1. Participants

To evaluate in what extent problem-solving training would improve innovative thinking by changing the weights of each latent variable, i.e., inhibition, cognitive flexibility, and reasoning, we tested this model in two sub-samples from Experiment 1. We proposed to the first sub-sample a cognitive problem-solving training and to the second sub-sample a crossword puzzle training.

Since cognitive training is a time-consuming procedure, we have chosen to minimize the number of individuals included in each sub-sample. Sixteen participants (age means \pm SD = 25.25 \pm 1.61 years, M/W=6/10) were allocated to the problem-solving training group. As such, they were invited to take part in two training sessions per week for a period of 12 weeks, i.e., 24 training sessions. Each session lasted approximately 1 hour and was performed individually under the supervision of a neuropsychologist. Fifteen participants (age means \pm SD = 28.42 \pm 0.21 years, M/W=5/10) were allocated to the crossword training group. All the participants executed the same sets of puzzles. This group was assigned the same number, frequency, and duration of sessions as the problem-solving group. Participants had previously not solved or

very rarely solved crossword puzzles. Both training groups did not differ significantly ($p>0.05$) with respect to age and sex.

3.1.2. Training

3.1.2.1 Problem-solving training

The subjects solved between 120 and 150 closed-ended problems during training, with an average of 10 problems per session. Some of these closed-ended problems were simple, while others were more complex. A simple closed-ended problem is a problem that has one right answer and one method by which this answer could be obtained. Finding the derivative of an algebraic expression is such a problem. In terms of the problem-solving taxonomy, simple closed-ended problems are solved primarily by diagnosis and routine. A complex closed-ended problem is a problem that has only one right answer but several methods to obtain this answer, and solving such problems requires using routines, diagnosis, and several strategies.

At the beginning of the training, the proposed problems were simple closed-ended problems, with the objective of providing an overview of the subject's ability to generate and use routines. However, a simple closed-ended problem generally requires a very simple interpretation step and a simple diagnosis that leads to the selection of a routine. We did not intend for the trained subject to become an expert in a particular routine or diagnosis, which is why we rapidly focused on complex close-ended problems that were sufficiently complex to cause the subject problem-solving difficulties.

In this context, we provided our training procedure to advance subjects. We wanted to increase subjects' practice in many areas of problem solving, with a focus on the nonroutine areas where the teaching of routines is necessary. Thus, we helped the subjects develop rules and formalized methods wherever possible, and then the subjects were expected to identify the best routine among those learned and to use the chosen routine accurately and quickly. We anticipated that this procedure might enable subjects to become more efficient and fluent in

their problem-solving strategies. Hence, we asked subjects to describe several possible attack plans, with advantages and disadvantages for each, and at the end, subjects decided on one and defended their choice. Care was taken to ensure the subject was aware of the decisions that they made and the reasons behind the decisions.

Throughout our training procedure, we first invited the subjects to define the goal clearly and identify relevant clues in the instructions that would provide them with key elements to reach this goal. Second, we encouraged the subjects not to limit the number of operators used to establish in the problem space, to avoid imposing constraints derived from the interpretation of instructions. Thus, if a subject consistently failed to solve the problem, despite the use of the procedure, we did not limit his reasoning. Third, we ensured that the subjects produced relevant planning steps and, in particular, intermediate planning steps that were essential for solving the problem. Finally, we developed cognitive flexibility in the subjects, which allowed them to extend beyond known heuristics and use frame breaking to facilitate the production of new solutions.

3.1.2.2 Crossword solving

French-language crosswords and arrow words were extracted from specialized crossword collections and used as crossword-solving problems.

Not all the crosswords and arrow words that we used were equally challenging. Indeed, there was a hierarchy of challenges. We designed a program that incorporated 50 arrows words and 50 crosswords. We determined three levels of difficulty (easy puzzle, medium-difficulty puzzle, and truly difficult puzzle) for both crossword and arrow word puzzles. We classified puzzles from the easiest to the most complicated. The subject was asked to follow this classification when using the puzzles and to solve puzzles twice a week for 1 hour. The subjects were given additional instructions, including to not get stuck on a puzzle if they were unable to finish it, but rather to start another one and come back to the pending puzzle later. We called

the subjects by phone every week to ensure that they were solving the puzzles and to ask them to report back on any issues or difficulties. This phone call was also an opportunity to remind the participant to move on to a higher level if the puzzles were too easy or to a lower level if the puzzles were too difficult. To ensure that solving crossword puzzles remained a leisurely activity, in keeping with the spirit of a pastime, puzzle solving occurred at the participants' homes in an atmosphere that respected the friendly environment in which this activity is usually performed. The collected training data (all the puzzles completed during the training) confirmed the full commitment of the participants during training.

3.1.3. Cognitive assessments

The cognitive assessment before training corresponds to the one performed in the first study. Thus, 1 month after the participants completed the evaluation, which gave us time to build and evaluate our model, the 31 participants randomly selected from the 83 participants began their respective training. One month after the end of the training, participants were reassessed with the same cognitive tasks as those used in the first assessment. Four new insight and four new non-insight problems were used. Three insight problems (Schooler et al., 1993; problems number 2, 5, and 6 described in Appendix A) and one insight and four non-insight problems selected from websites. Unresolved problems during pre-assessment were presented again at the post-assessment.

The effects of each training are assessed by comparing the two assessments.

3.2. Results

To ensure that our sampling did not change anything to our model, and check for equivalence between the problem-solving and crossword groups before training, we assessed a structural model based on data acquired before training. Similar to the results from all 83

subjects in study 1, the results showed that the model was statistically significant for the 2 groups ($F \geq 7.85$, $p \leq 0.002$, with an R^2 value ≥ 0.48) (data not shown). All the path coefficients were positive. Only reasoning had a significant influence on innovative thinking ($\beta \geq 0.541$, $p \leq 0.007$). The relationships between innovative thinking and cognitive flexibility or inhibition were weak and nonsignificant ($p \geq 0.179$). The effect size revealed a strong effect of reasoning on innovative thinking ($f^2 \geq 0.41$) and a weak effect of the other 2 paths ($f^2 \leq 0.03$).

The results of the multigroup t-test yielded no significant difference, indicating that the problem-solving and crossword groups performed similarly before training and were similar to all 83 subjects. Thus, because the structural model was similar in all groups, one may reasonably postulate that any changes in path coefficients were an effect of the training itself.

After training and in the crossword group, the structural model was statistically significant ($F=6.48$, $p=0.009$; $R^2=0.64$). Only reasoning was significant, and this factor was positively correlated with innovative thinking ($\beta=0.652$, $p=0.008$) (Fig 2A). The effect size of each path is displayed in Table 3.

In the problem-solving training group, the model was statistically significant ($F=11.33$, $p=0.001$) with substantial explained variance ($R^2=0.74$). Reasoning had a weak and nonsignificant negative influence on innovative thinking. In this model, only cognitive flexibility was significant, and it was strongly positively correlated with innovative thinking ($\beta=0.747$, $p=0.001$) (Fig 2B). The effect size of each path is displayed in Table 3.

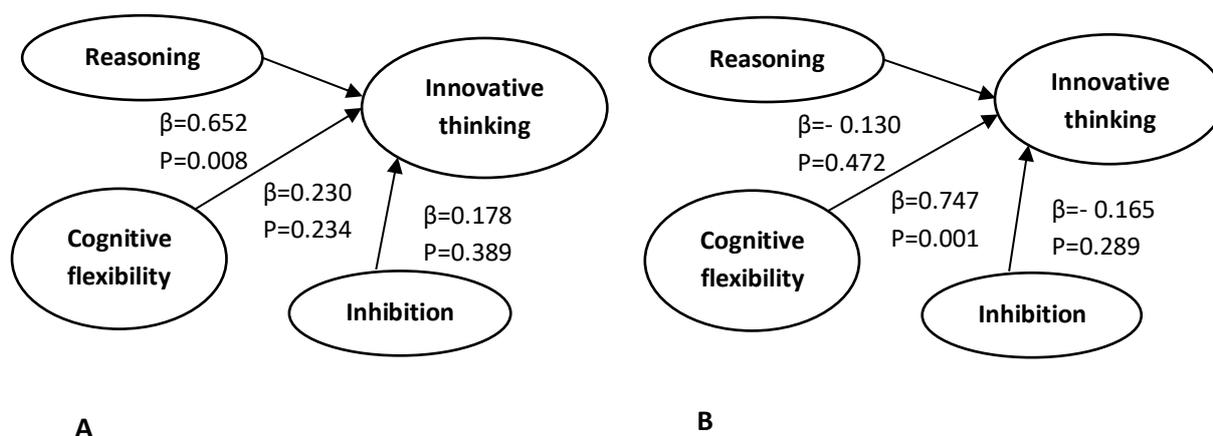


Fig. 2: Structural model of the direct effects of reasoning, cognitive flexibility, and inhibition on innovative thinking after training in subjects following crosswords (A) and problem-solving training (B).

Paths	f2	Magnitude of the effect
Model of crosswords group		
Reasoning on Innovative thinking	0.97	Substantial
Cognitive flexibility on Innovative thinking	0.14	Moderate
Inhibition on Innovative thinking	0.07	Low
Model of problem-solving training group		
Reasoning on Innovative thinking	0.05	Low
Cognitive flexibility on Innovative thinking	1.51	Substantial
Inhibition on Innovative thinking	0.07	Low

Table 3. Effects sizes of the structural model paths.

The results of the multigroup t-test showed a significant difference between the crossword and problem-solving training groups for the path coefficient related to reasoning–innovative thinking ($t(29)=2.03$; $p=0.0$).

In terms of the composite score calculated by the PLS-SEM analysis for the latent variable innovative thinking, a Student t-test analysis yielded on the two groups of participants

for this composite score showed a significant effect of group ($t(29)=2.04$; $p=0.04$), problem-solving-trained subjects had higher scores than did the crossword group of subjects.

4. Experiment 3: Resting state network connectivity

This pilot study was aimed to evaluate in what extent training can induce permanent changes in the brain assessing by resting state functional connectivity.

4.1. Methods

4.1.1. Participants

Only the 16 participants of the problem-solving group have participated to this study. All participants were right-handed. Functional MRI acquisitions were completed before and after problem-solving training a few days after the cognitive assessment.

4.1.2. Magnetic resonance imaging data

The 16 subjects were scanned on a 3-Tesla BRUKER MEDSPEC 30/80 MRI scanner equipped with a circular polarized head coil at the MRI Center of La Timone (Center IRM-INT@CERIMED, UMR 7289, in Marseille). Subjects were asked to rest with their eyes closed during the scan but not fall asleep. T1 anatomical images and fMRI images were acquired in the axial plane, parallel to the anterior-posterior commissure axis, and covered the whole brain. Whole brain anatomical MRI data were acquired using a high-resolution structural T1-weighted image (MPRAGE sequence, resolution 1x1x1 mm). Resting state fMRI scans were acquired using a BOLD T2*-weighted echo planar imaging (EPI) gradient-echo pulse sequence with TR=2.4 sec, TE=30 msec, flip angle=78°, FOV=192 mm, voxel size=3x3x3 mm, matrix=64x64, slice thickness=3 mm, 0.75 mm gap, and 36 slices. The total acquisition time for the fMRI was 10 minutes. A total of 250 volumes were collected for each subject. The first 5 images were discarded to allow for stabilization of the MRI signal, leaving 245 volumes for

analysis. The ethical committee of the hospital approved the protocol. All the experiments were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. Written informed consent was obtained from all individuals.

4.1.3. Data analysis

The MR images were preprocessed using SPM8 software (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/>) running in a Matlab 7.5 environment (Mathworks, Inc., Sherbon, MA, USA). To perform image analysis, the 245 images were first slice-time corrected, realigned to the first image, unwrapped, and then co-registered to structural data. Four datasets that were affected by head movements more than 3 mm in translation or rotation were rejected. Accordingly, the final population considered for analysis included 12 individuals.

The preprocessed data of all 12 participants were decomposed using the group spatial independent component analysis (ICA) of the Group ICA of fMRI Toolbox (GIFT v1.3i)(<http://icatb.sourceforge.net/>)(Calhoun, et al., 2001). This process allowed us to identify the spatial sources of resting state signals. Each independent component (IC) selected was considered to reflect a functional RSN. The Infomax algorithm was computed 10 times with different initial conditions. Twenty spatially ICs were then estimated by a minimum description length criterion. ICAs were performed using the ICASSO function and included 5 iterations. The ICASSO results showed an average Iq of 0.97 ± 0.007 SD, indicating a high stability of the estimated components (Calhoun et al., 2001). The components that were deemed to be artifacts were excluded. Twelve components were retained. To identify the functional networks, the components were visually inspected and compared to descriptions of RSNs previously described in the literature. A template matching procedure was performed (correlation above 0.5) where ICs were compared to templates from the study by Allen et al. (2011). From each

IC, the regions-of-interest (ROIs) were extracted using the GIFT stats utility. This tool allowed us to identify which clusters were statistically significant for each component; the threshold of the one-sample t-test against zero was set at $p < 0.05$, with a false discovery rate (FDR) correction for multiple comparisons. Using the MarsBar toolbox (Brett, Anton, Valabregue & Poline., 2002), spherical ROIs were created with a radius of 6 mm and centered on the Montreal Neurological Institute coordinates of the cluster peaks. These ROIs were then used for functional connectivity and graph theoretical analyses.

Functional connectivity analyses were performed using the Functional Connectivity (CONN v15 h) toolbox, which included an ROI-based correlation analysis (<http://web.mit.edu/swg/software.htm>; Whitfield-Gabrieli and Nieto-Castanon, 2012). Preprocessed images were bandpass filtered at 0.01 Hz-0.08 Hz to reduce the effect of low-frequency drift and high-frequency noise. Realignment parameters were defined as first-level covariate confounds. White matter, cerebrospinal fluid motion, and Artifact Detection Tools (ART) outliers were taken as confounds (Behzadi et al., 2007). Correlation coefficients were calculated between each pair of ROIs. The toolbox performed the first-level general linear model test to determine the correlation connectivity at the individual level. Correlation coefficients were then converted into z-scores, and a paired t-test was used to determine significant connections between pre- and postsessions in the problem-solving trained participants, with a threshold set at $p < 0.05$ FDR-corrected.

Graph theoretical analysis was performed to further evaluate the features of the RSNs using the CONN v15 toolbox. According to graph theory, brain networks can be described as graphs composed of nodes (ROIs), with edges (functional connections) among the nodes (Watts and Strogatz, 1998). The time-series of the low-frequency BOLD signals were extracted for each of the ROIs and averaged over all voxels in each node. For each subject, an undirected correlation matrix (Pearson) was computed. To compare the groups, the CONN default setting

'cost' (connection density) was chosen and set at a threshold of 0.15 (Bassett and Bullmore, 2006), meaning that 15% of all the possible edges in the network were present. Topological properties, which included measures such as degree, local efficiency, and global efficiency, were then evaluated. Degree is a measure of the number of connections of a node. Local efficiency measures how efficiently the network exchanges the information at the clustering level, it is computed on node neighborhoods and is related to the clustering coefficient, which is a measure of the degree to which nodes in a graph form a cluster. Global efficiency measures how efficiently the network exchanges information at the global level. This metric is inversely related to the characteristic path length, which describes the number of edges between one node and any other node in a network and provides an overview of the effectiveness of information transfer (Bassett and Bullmore, 2006). Graph theoretical metrics were threshold at $p\text{-FDR} < 0.05$ in a two-sided analysis.

4.2. Results

The results of the ICA analyses on the problem-solving group that showed a spatial network structure are displayed in Fig. 3.

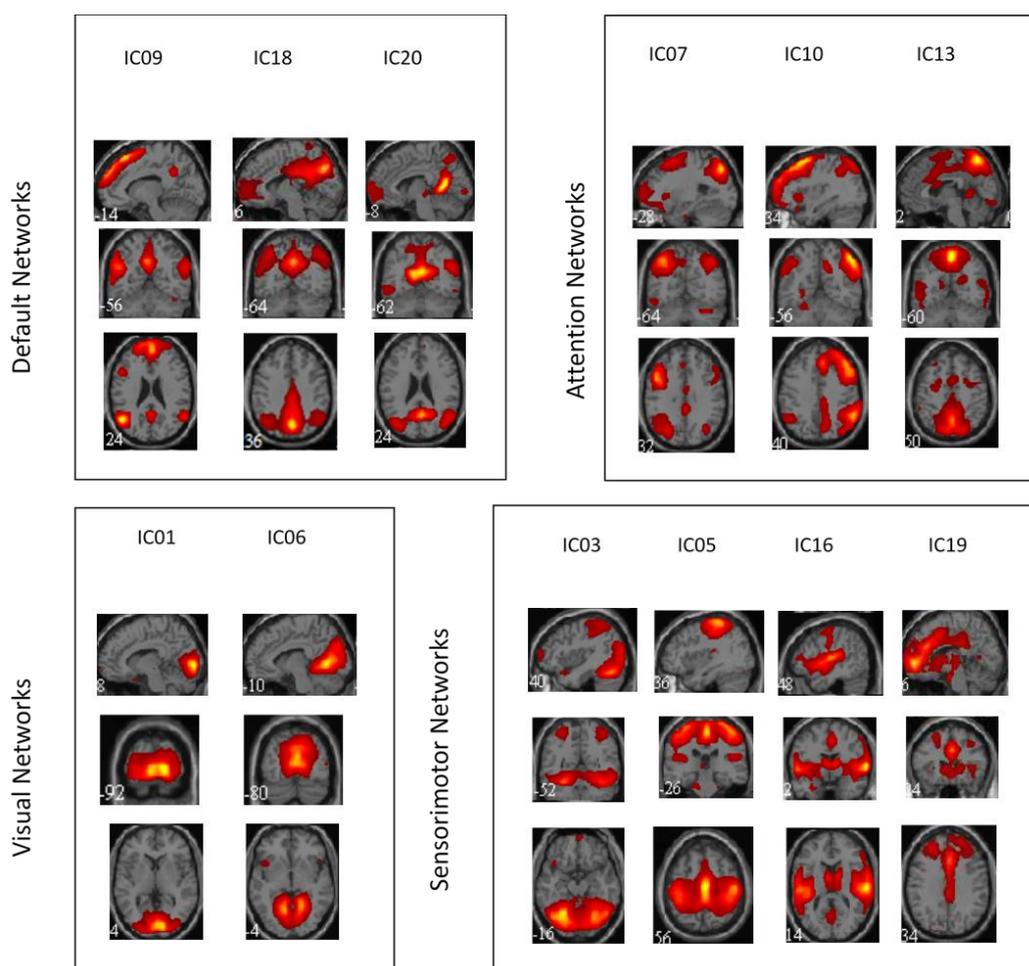


Fig. 3. Depiction of the twelve Resting State Networks (RSN) identified by Independent Component Analysis (ICA). The RSNs are grouped into four categories based on their relation to reference networks – default mode, attention, visual, and sensorimotor networks. All images were thresholded at $p < 0.05$ (FDR-corrected).

Table 4 provides details on the brain regions of each IC. Of the 12 ICs selected, IC09, 18, and 20 are considered part of the DMN. IC07, 10, and 13 are related to the AN. The visual network (VN) is represented in two group-level ICs, IC01 and 06. IC03, 05, 16, and 19 correspond to the SMN.

RSN	Name	x	y	z	Maximal voxel t-value
DMN					
IC09	Left Precuneus	-3	-57	30	15.20
	Left Superior Medial Gyrus	0	57	21	25.98
	Right Precentral Gyrus	39	-12	54	5.23
IC18	Left Angular Gyrus	-45	-66	33	30.12
	Right Middle Frontal Gyrus	36	18	39	7.60
	Right Precuneus	12	-63	30	25.43
	Right Superior Frontal Gyrus	24	69	9	7.97
IC20	Left Superior Frontal Gyrus	-24	-3	57	10.57
	Right Superior Frontal Gyrus	27	27	51	12.23
Attention Network					
IC07	Left Fusiform Gyrus	-30	-12	-33	8.91
	Left Inferior Frontal Gyrus (p. Triangularis)	-45	24	21	21.84
	Left Inferior Temporal Gyrus	-51	-42	-15	10.02
	Left Posterior Cingulate Cortex	0	-33	33	9.98
	Right Inferior Frontal Gyrus (p. Triangularis)	51	24	27	5.56
	Right Inferior Parietal Lobule	42	-51	45	16.95
	Right Inferior Temporal Gyrus	63	-48	-15	14.74
	Right Middle Cingulate Cortex	0	-3	30	10.88
IC10	Left Inferior Parietal Lobule	-54	-54	36	11.78
	Right Inferior Parietal Lobule	57	-51	42	39.07
	Right Middle Temporal Gyrus	66	-36	-9	8.41
	Right Superior Orbital Gyrus	18	15	-21	7.14
IC13	Left Fusiform Gyrus	-36	-36	-18	7.76
	Left Insula Lobe	-39	3	3	8.19
	Left Middle Frontal Gyrus	-27	39	36	7.27
	Left Middle Temporal Gyrus	-54	-60	-3	12.01
	Right Insula Lobe	45	12	3	12.73
	Right Middle Frontal Gyrus	39	-12	-21	6.81
Visual Network					
IC01	Left Lingual Gyrus	-9	-93	-15	16.44
IC06	Area 17	-12	-87	3	17.19
	Left Inferior Parietal Lobule	-42	-27	36	7.75
	Left Middle Occipital Gyrus	-39	-69	6	6.99
	Left Middle Temporal Gyrus	-60	-33	6	8.95
	Right Middle Temporal Gyrus	51	-69	6	12.90
Sensorimotor network					

IC03	Left Superior Parietal Lobule	-21	-69	51	14.80
	Right Cerebellum	24	-60	-21	22.90
	Right Superior Frontal Gyrus	33	60	15	6.01
	Right Superior Medial Gyrus	3	63	30	6.96
	Right Superior Temporal Gyrus	54	-30	3	6.32
	RightPrecentral Gyrus	60	6	33	5.73
IC05	Left Cerebellum	-12	-39	-27	9.57
	Left Inferior Temporal Gyrus	-42	-36	-24	6.32
	Left Rectal Gyrus	-6	15	-21	10.00
IC16	Left Cerebellum	-18	-69	-21	8.74
	Right sensorimotor area	3	-18	51	11.84
IC19	Left Calcarine Gyrus	-3	-60	12	4.95
	Left Olfactory cortex	-6	24	-6	20.22
	Left Postcentral Gyrus	-36	-42	60	5.83

Table 4. Independent component analysis (ICA) results. The table lists brain peak x, y, z coordinates in MNI stereotaxic space for each separate brain region, anatomical labels, and t statistics from the one sample t-tests that determined the spatial structure of each network. Results were thresholded at $p < 0.05$ (FDR-corrected). Default Mode Network (DMN)

Functional connectivity analyses before and after problem-solving training revealed significant changes in the AN and VN ($p\text{-FDR} \leq 0.05$). Within the AN, functional connectivity increased between the right inferior frontal gyrus and the left fusiform gyrus following training ($t(11)=4.21$; $p\text{-FDR}=0.024$). Within the VN, the left middle occipital gyrus demonstrated significantly higher connectivity with the left lingual gyrus ($t(11)=3.67$; $p\text{-FDR}=0.018$) and the left middle temporal gyrus ($t(11)=3.01$; $p\text{-FDR}=0.03$) following problem-solving training. Within the DMN, functional connectivity increased between the right precentral gyrus and the right precuneus but did not reach a significant $p\text{-FDR}$ -corrected threshold ($t(11)=2.92$; $p\text{-FDR}=0.12$ and $p\text{-uncorrected}=0.014$). Similarly, a nonsignificant decrease in connectivity strength between the right precentral gyrus and the right middle frontal gyrus was noted

following problem-solving training ($t(11)=-2.30$: $p\text{-FDR}=0.23$ and $p\text{-uncorrected}=0.041$).

Within the SMN, no significant connectivity values were noted.

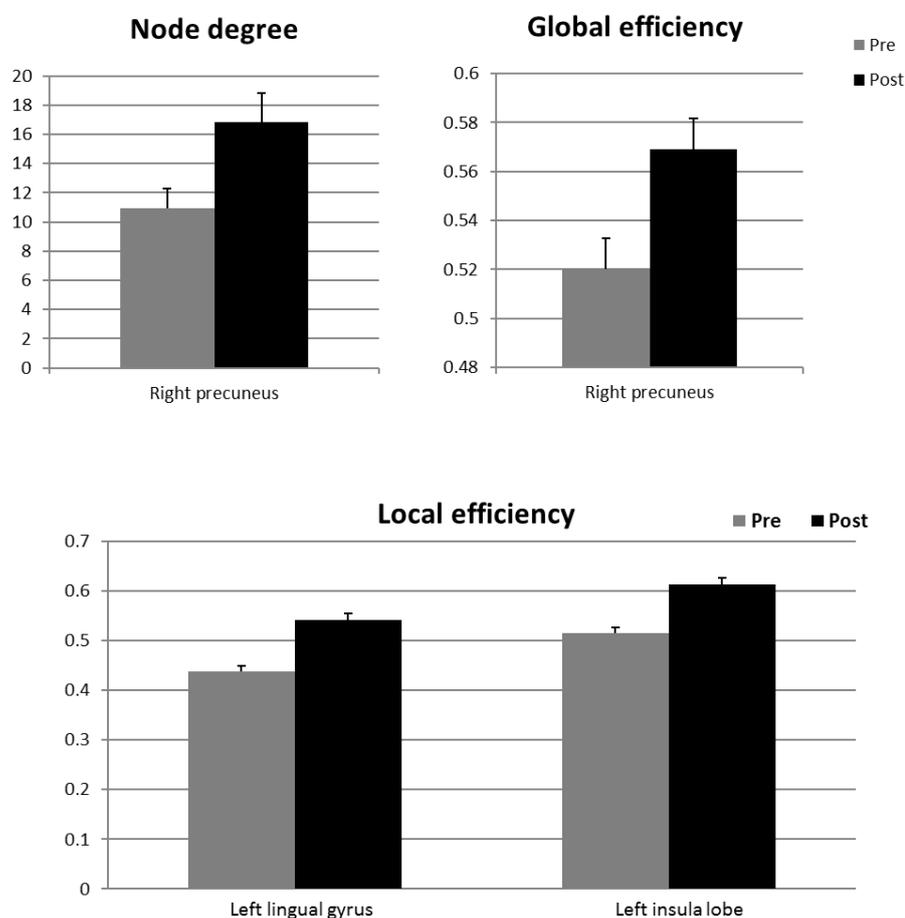


Fig. 4. Mean and SEM values for nodal metrics in regions with statistically significant group differences ($p\text{-FDR}<0.05$) between pre- and post-problem-solving training.

The results of the graph theoretical analyses are shown in Fig. 4. Network properties at the global level showed no significant differences when compared before and after problem-solving training. In contrast, we found significant differences in network properties at the nodal level. With the FDR-corrected significance threshold, differences in nodal metrics were found in node degree, and local and global efficiencies. Following problem-solving training, participants demonstrated increased node degree ($p\text{-FDR}=0.01$) and global efficiency ($p\text{-FDR}=0.01$).

FDR=0.006) in the right precuneus, which belongs to the DMN. Local efficiency values for the left lingual gyrus, which belongs to the visual network (p-FDR=0.04), and the left insular lobe, which belongs to the attention network (p-FDR=0.03), increased following problem-solving training

5. Discussion

This study examined whether problem-solving training modifies cognitive functioning and relates to resting-state functional connectivity changes in healthy adult subjects. Data analyses of cognitive measures using PLS-SEM showed that innovative thinking was influenced by reasoning in non-trained subjects, whereas innovative thinking was influenced by cognitive flexibility following problem-solving training. Thus, we argue that a cognitive intervention based on problem solving promotes innovative thinking by changing the way subjects recruit and use relevant cognitive processes to cope with demand.

The PLS-SEM modeling used in the present study emphasized the insight and non-insight problems, both of which belong to the same latent variable of innovative thinking. Insight is often defined as a subjective feeling of a sudden understanding that accompanies problem solving (Webb, Little & Cropper., 2016; Weisberg, 2014). This feeling could be due to the existence of unconscious processes, which suggests that critical steps in insight solutions are not reported (Kaplan & Simon, 1990). Work by Schooler et al. (1993) showing evidence that processes associated with insight problem solving are not available in a verbal report agrees with this interpretation. In contrast, according to Bowden (1997), non-insight problems are solved through the use of knowledge and logical deductions. However, Metcalfe and Wiebe (1987) believe there is a very fine distinction between insight and non-insight problems. Weisberg (2014) confirmed this view by reporting that insight and non-insight problems can be solved with both processes. Therefore, it is essential to receive feedback from the problem solver on the processes used (i.e., insightful or analytic) to solve a problem.

A single problem task can be used as indicator of both insightful and non-insightful problem solving. In these cases, the feelings of the subject determine how the problem is solved (i.e., insightful or analytic). Considering these issues, we systematically asked the subjects how they resolved the problem and what their feedback was regarding feeling or the occurrence of insights. This is an important point to consider when interpreting the effects of our training, i.e., which aspects have been influenced by changes in the recruitment of cognitive functions and their involvement in innovative thinking. Note that only non-insight problems were used in our training. Having trained the subjects with these problems, we can show that these problems were resolved through the generation and use of routines, as well as through the use of conscious strategies. However, toward the end of the training, we noted that subjects showed greater abilities to use particular strategies spontaneously and therefore without necessarily being aware of their choice.

Thus, training with complex closed-ended problems appeared to facilitate problem solving through the experience of insight. We believe that this facilitation was possible via the strengthening of cognitive flexibility, which played a leading role during training. The problems used in our training program were chosen to be sufficiently complex to cause the subject serious difficulty, such that they failed. We then increased subjects' practice in many areas of problem solving, with a focus on nonroutine areas. We insisted on the advantages of not limiting reasoning and using frame breaking to facilitate the production of new solutions. Moreover, the use of a large number of problems allowed us to emphasize fluency in strategies. Finally, care was taken to ensure that the subject was aware of the decisions they made and the reasons behind them. The goal was for the subject to memorize as many strategies as possible such that they created a library from which they could draw ideas or processes to solve future problems. Once this library was created, we trained subjects on the flexible implementation of various strategies.

This procedure may have facilitated the elaboration of unconscious inference processes that produced insight solutions. Our training procedure could contribute to the unconscious activation of critical steps by strengthening processes involved in innovative thinking, such as juggling opposing thoughts (induction and deduction), reversal (flipping assumptions), recombination and rearrangement, and re-encoding, that involve changes in perceptual interpretations and facilitate frame breaking.

Successful problem-solving training seemed to have an effect on regional functional connectivity in neural networks involving the DMN, the AN, and the VN. Changes in the connectivity of resting state networks following problem-solving-based training corroborate studies using different cognitive training programs (Jolles et al., 2013; Fink et al., 2015; 2018). In studies conducted by Fink et al. these brain changes occur after 3 weeks of verbal divergent thinking training. The training consists of 144 exercises organized in 18 training modules of 20 minutes each. We used a similar number of exercises (between 120 and 150 closed-ended problems) and training sessions (24 training sessions). However, our training was more widely distributed, with two sessions per week compared to six sessions per week in the study by Fink et al. Although the nature of the training is different between the two studies, our results support the idea that training must be long enough to cause changes in the resting state connectivity.

Graph theory analysis highlighted the right precuneus within the DMN. Indeed, two measures were increased in participants who underwent problem-solving training, namely, degree and global efficiency. Thus, the right precuneus in problem-solving-trained subjects showed more connections that connected it to the rest of the network. Since global efficiency is mainly influenced by short paths (Rubinov and Sporns, 2010), the connections of the right precuneus are intended to be with its closest regions. Such short path lengths are believed to promote functional integration since they allow communication with few intermediate steps and thus minimize the effects of noise (Sporns and Honey, 2013). The right precuneus is a

major node in the main functional and structural networks of the human brain (Hagmann et al., 2008) with a relevant role within the DMN (Utevsky et al., 2014). The precuneus is primarily involved in retrieval of information from working memory or episodic memory, especially the retrieval and processing of spatial images, visuospatial imagery, and self-processing operations (Cavanna and Trimble 2006). The precuneus is also a critical brain region in insight processing. Luo (2004) demonstrated that answers requiring the breaking of mental sets and the transformation of conventional thinking significantly activated the right precuneus.

With respect to the attentional network, we showed increased functional connectivity between the left fusiform and the right lower frontal gyri. The fusiform gyrus is an integral part of the ventral occipitotemporal junction, a region that is widely involved in cognitive processes such as the perception of faces, objects, places, or words. Interestingly, many studies have shown that activation in the fusiform gyrus is associated with insight tasks (Qiu et al., 2010; Zhang et al., 2011). Shen et al., (2013) argued that the fusiform gyrus is involved in the formation of new images and remote associations based on visual imagery. Based on these findings, the involvement of the left fusiform gyrus after problem-solving training could reflect a shift toward a new way of thinking that is less governed by language and more focused on images and mental imagery. Some studies attribute to mental imagery a potentially influential role in creativity (Martindale, 1990; Leboutillier and Marks, 2003; Kozhevnikov et al., 2013). It could therefore be that problem-solving training has promoted this shift towards mental imagery, which in turn has fostered innovative thinking in the trained subjects by making them more flexible.

After training, the problem-solving group showed an improved score on the Minnesota task, a measure of the latent factor of innovative thinking, thus favoring this hypothesis. Indeed, the Minnesota task mainly involved imagery capacity, spatial observation, mental visualization skill, and the ability to visualize and manipulate objects in space. The inferior frontal gyrus is

reported to play a diverse role in evaluating the potential relevance of sensory stimuli and in inhibiting inappropriate responses (Konishi et al., 1999). Aron et al., (2004) indicated that only the right inferior frontal gyrus is involved in the inhibition of inappropriate responses. Evidence exists to show that inhibitory control can support creativity (Storm and Angello, 2010; Cassotti et al., 2016). Kleibeuker et al. (2013) reported an activation of the inferior frontal gyrus in subjects who provided optimal solutions to creative problems and Shen et al., (2016) reported the strong activation of the right inferior frontal gyrus during a compound remote association task related to creative thinking. Thinking about something new and original requires inhibiting the first solutions that come to mind in order to be able to explore new ideas later on. Our problem-solving training involved complex closed-ended problems that require several methods and strategies to be resolved. The variety of our problems makes that the subject must regularly find new strategies and thus get off the beaten track to solve the problem correctly which implies to regularly inhibit spontaneous strategies that first come to mind. Thus, the increased connectivity between the left fusiform gyrus and the right inferior frontal gyrus during resting state supports the idea that the greater ability of trained subjects to develop innovative thinking relies on the relevance of the stimuli and the inhibition of inappropriate responses, on the breaking of mental sets and restructuring, and on the facilitation of the original images and remote associations based on visual imagery.

Graph theory analyses performed within the AN indicated an increase in local efficiency in the left insular lobe after problem-solving training. The insula is a brain structure involved in disparate cognitive, affective, and regulatory functions that is involved in the psychological processes that underlie emotional experience, working memory, and attentional shift. In the model developed by Menon and Uddin (2010), the insula facilitates bottom-up access to the brain's attentional and working memory resources. The left insula is also involved in serial processing; it is sensitive to salient environmental events and marks such events in time and

space for further processing. The role of the insula may be associated with the “Aha!” experience and the interactions between cognition and emotion in insight problem solving (Luo et al., 2004); however, Aziz-Zadeh et al., (2009) reported that the left insula was also activated during routine problem solving. Increases in insular local efficiency, a measure of integration among neighbors of a node, suggest that in participants trained for problem solving, the insula is embedded within a richly connected environment. In other words, the cognitive processes associated with training have allowed the insula to take a more central position in the network. The involvement of attention networks, with an emphasis on the left fusiform gyrus, the right inferior frontal gyrus, and the left insular lobe, can explain the cognitive results found in the PLS-SEM analysis, which showed changes in cognitive functioning in favor of cognitive flexibility in the promotion of innovative thinking.

The visual network includes regions of the occipital lobe (lingual and middle occipital gyri and area 17), inferior parietal lobule, and middle temporal gyrus bilaterally. The functional connectivity analysis revealed an increase in connectivity between the left middle occipital gyrus, the left middle temporal gyrus and the left lingual gyrus as a result of problem-solving training. The occipitotemporal functional connection indicates involvement of the ventral visual pathway (Goodale, 2011). As argued by Kravitz et al, (2013), the ventral pathway is implicated in the formation of specific representations or associations involving stable stimuli from visual information. Consistent with this hypothesis, it can be argued that the processes associated with our training program stimulated many stable visual configurations from complex closed-ended problems.

The lingual gyrus is located near the ventral visual pathway, and it plays a vital role in vision and dreaming (Dresler et al., 2015; Luo et al., 2013). This region also stimulates and redirects problem space when there is a need to link original connections between different representations of a heuristic prototype and a target problem. More specifically, research has

shown that the lingual gyrus is associated with visual memory (Bogousslavsky et al., 1987), vivid visual imagery (Belardinelli et al., 2009), and motion imagery (Malouin et al., 2003). In addition, the lingual gyrus works with the cuneus in visuospatial ability, somatosensory stimulation, and perception of sensory stimuli (Kong et al., 2009). Graph theory analysis reinforced the involvement of the lingual gyrus within the visual network. Indeed, we have shown that the local efficiency of this region increased as a result of problem-solving training, suggesting that among the trained participants, the neighboring regions of the left lingual gyrus were highly interconnected. Thus, the activation of the lingual gyrus may help recover heuristic knowledge that facilitates the formation of new nonverbal information.

The left middle temporal gyrus is involved in declarative memory (squire et al., 2004) and belongs of the semantic system involved in storage and retrieval of semantic information. Interestingly, Fink et al., (2015) reported an activation of the left middle temporal gyrus during the practice of the instance task that consisted to fluently generate common and typical conditions or facts applied to given adjective without originality instruction after training of verbal creativity. On the contrary, a low activation in the left middle temporal gyrus is associated with the AUT after the same training. In view of these data, one possible interpretation of our results would be that the increased connectivity between the left middle occipital gyrus, the left middle temporal gyrus and the left lingual gyrus as a result of problem-solving training may reflect improved retrieval from declarative memory which foster a more effective use of generation strategies from semantic, visual, and visuospatial information.

5.3 Conclusion and future directions

Overall, we reported that a cognitive intervention based on complex closed-ended problem solving improved innovative thinking by changing the way the subjects recruit and use relevant cognitive processes to cope with the demand. Improved innovative thinking was

reflected in trained subjects by a strengthening of mental flexibility. Our fMRI data showed that this change was underpinned by a modification in the regional connectivity of brain networks at rest that are involved in creative processes. These connectivity modifications indicate that changes in the way of thinking of trained subjects would occur through nonverbal information, including visual and visuospatial information and mental imagery. These results are promising for the development of new interventions that can help healthy or pathological individuals cope with the challenges of their daily lives. These results may even have applications in education. Future studies should confirm the effectiveness of this type of training in an ecological environment and determine how it can be judiciously integrated into holistic rehabilitation in patients with pathologies. The study of cerebral connectivity at rest will be quite helpful in understanding how brain networks are restructured after cognitive functioning reorganization. Assessing whether this restructuring of networks is sustainable for a long period of time will then be essential. It will also be necessary in the future to assess the specificity of changes in brain connectivity at rest. Indeed, while there is no doubt that these changes are due to problem-solving training, we do not know whether these changes or some of them would occur after crossword solving training. Answering this question would allow us to distinguish cognitive processes and related brain changes common to both trainings from those specific to each of them.

Acknowledgments

This work was supported by the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Aix-Marseille University (AMU), and by grant PDH-1-SMO1-0203 from DGA.

Author contributions

B.A.L., C.C. and M.H.F conception and design of research; B.A.L., C.D. and C.C. performed the experiments; G.E. computer development of cognitive tasks; J.L.A. fMRI acquisition

sequences, VP analyzed data and prepared figures; B.A.L. and V.P. interpreted results of experiments and wrote the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

The opinions or assertions expressed herein are the private views of the authors and are not to be considered as official or as reflecting the views of the French Military Health Service.

References

- Alescio-Lautier B, Sambuchi N, Michel BF & Chambon C. (2019) Can multifactorial cognitive training slow down the cognitive decline in early Alzheimer patients? *Journal of Alzheimer's Disease & Parkinsonism*. 9 (4), 470.
- Allen, E.A., Erhardt, E.B., Damaraju, E., Gruner, W., Segall, J.M., Silva, R.F., et al. (2011). A baseline for the multivariate comparison of resting-state networks. *Front Syst Neurosci*, 5, 2. doi: 10.3389/fnsys.2011.00002. eCollection 2011.
- Aron, A.R., Monsell, S., Sahakian, B.J., & Robbins, T.W. (2004). A componential analysis of task-switching deficits associated with lesions of left and right frontal cortex. *Brain*, 127, 1561-1573.
- Aziz-Zadeh, L., Kaplan, J.T., & Iacoboni, M. (2009). "Aha!": The neural correlates of verbal insight solutions. *Hum Brain Mapp*, 30, 908-916. doi: 10.1002/hbm.20554.
- Baruah J and Paulus P.B. (2008) Effects of Training on Idea Generation in Groups. *Small Group Research*, doi:10.1177/1046496408320049
- Bassett, D.S., & Bullmore, E. (2006). Small-world brain networks. *Neuroscientist*, 12, 512-523. DOI: 10.1177/1073858406293182

- Benedek, M., Jauk, E., Sommer, M., Arendasy, M., & Neubauer, A. C. (2014). Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity. *Intelligence*, 46,73–83. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.05.007>
- Behzadi, Y., Restom, K., Liau, J., & Liu, T.T. (2007). A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI. *Neuroimage*, 37, 90-101.
- Belardinelli, P., Ciancetta, L., Staudt, M., Pizzella, V., Londei, A., Birbaumer, N., et al. (2009). Motor control in young patients with unilateral brain lesions: an MEG study. *Cogn Process*, 10, 185-188. doi: 10.1007/s10339-009-0282-y.
- Bogousslavsky, J., Miklossy, J., Deruaz, J.P., Assal, G., & Regli, F. (1987). Lingual and fusiform gyri in visual processing: a clinico-pathologic study of superior altitudinal hemianopia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 50, 607-614.
- Bollen K., and Lennox R. (1991) Conventional wisdom on measurement: a structural equation perspective. *Psychol Bull.* 110, 305-3014.
- Bowden, E.M. (1997). The effect of reportable and unreportable hints on anagram solution and the aha! experience. *Conscious Cogn*, 6, 545–573. doi: 10.1006/ ccog.1997.0325
- Brett, M., Anton, J.L., Valabregue, R., & Poline, J.B. (2002). Region of interest analysis using an SPM toolbox. Presented at the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan. Available on CD-ROM in *NeuroImage*, Vol 16, No 2.
- Calhoun, V.D., Adali, T., Pearlson, G.D., & Pekar, J.J. (2001). A method for making group inferences from functional MRI data using independent component analysis. *Hum Brain Map*, 14, 140–151.
- Cao, W., Cao, X., Hou, C., Li, T., Cheng, Y., Jiang, L., et al. (2016). Effects of Cognitive Training on Resting-State Functional Connectivity of Default Mode, Salience, and

- Central Executive Networks. *Front Aging Neurosci*, 8, 70. doi: 10.3389/fnagi.2016.00070. eCollection 2016.
- Cassotti, M., Agogu , M., Camarda, A., Houd , O., & Borst, G. (2016). Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood. In B. Barbot (Ed.), *Perspectives on creativity development. New Directions for Child and Adolescent Development*, 151, 61–72.
- Cavanna, A., & Trimble, M. (2006). The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*, 129, 564-583.
- Chambon, C., Herrera, C., Romagu re, P., Paban, V., & Alescio-Lautier B. (2014). Benefits of a recognition-based memory and attention training program on retrieval in healthy older adults. *Psychol Aging*, 29, 731-743. doi: 10.1037/a0037477
- Chambon C & Alescio-Lautier B. (2019) Improved Executive functioning in healthy elderly after a multifactorial cognitive training targeting controlled processes. *Journal of Systems and Integrative Neuroscience*, 6, 1-9. doi: 10.15761/JSIN.1000218
- Chapman, S.B., Aslan, S., Spence, J.S., Hart, J.J., Bartz, E.K., Didehbani, N., et al. (2015). Neural mechanisms of brain plasticity with complex cognitive training in healthy seniors. *Cereb Cortex*, 25. 396-405. doi: 10.1093/cercor/bht234.
- Clapham, M.M. (1997). Ideational skills training: A key element in creativity training programs. *Creativity Research Journal*, 10, 33-44.
- Cropley, A. (2006). In praise of convergent thinking. *Creativity Research Journal*, 18, 391-404. Doi: 10.1080/10400419.2017.1376543.
- Dresler, M., Wehrle, R., Spoormaker, V., Steiger, A., Holsboer, F., Czisch, M., et al. (2015). Neural correlates of insight in dreaming and psychosis. *Sleep Med Rev*, 20, 92-99. doi: 10.1016/j.smr.2014.06.004.

- Fink, A., Benedek, M., Koschutnig, K., Pirker, E., Berger, E., Meister, S., ... Weiss, E. (2015). Training of verbal creativity modulates brain activity in regions associated with language- and memory-related demands. *Human Brain Mapping*, 36, 4104–4115. <https://doi.org/10.1002/hbm.22901>
- Fink A., Benedek M., Koschutnig K., Papousek I., Weiss E.M., Bagga D., Schöpf V. (2018) Modulation of resting-state network connectivity by verbal divergent thinking training. *Brain and cognition*. 128, 1-6. doi.org/10.1016/j.bandc.2018.10.008
- Gates, N., & Valenzuela M. (2010). Cognitive exercise and its role in cognitive function in older adults. *Curr Psychiatry Rep*, 12, 20–27. doi: 10.1007/s11920-009-0085-y.
- Golden, C. J., 1978. Stroop color and word test. Wood Dale, IL: StoeltingCo.
- Goles, T., & Chin, W.W. (2005). Information systems outsourcing relationship factors: detailed conceptualization and initial evidence. *Acm Sigmis Database*, 36, 47-67.
- Goodale, M.A. (2011). Transforming vision into action. *Vision Res*, 51, 1567-1587.
- Guilford, J. P. (1967). *The nature of human intelligence*. New York, McGraw-Hill.
- Haenlein, M., & Kaplan, A.M. (2004). A beginner's guide to partial least squares analysis. *Underst Stat*. 3, 283–297
- Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C.J., Wedeen, V.J., et al. (2008). Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLoS Biol*, 6, e159. doi: 10.1371/journal.pbio.0060159.
- Hair, J.F., Hult, G.T.M., Ringle, C.M., & Sarstedt, M. (2014). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLSSEM)*. Sage, Thousand Oaks
- Heaton, R.K., Chelune, G.J., Talley, J.L., Kay, G.G., & Curtiss, G. (1993). In *Wisconsin Card Sort Test Manual: Revised and Expanded*. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.

- Herrera, C., Chambon, C., Michel B.F., Paban, V., & Alescio-Lautier, B. (2012). Positive effects of computer-based cognitive training in adults with mild cognitive impairment. *Neuropsychologia*, 50, 1871-1881. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.04.012
- Hussey, E.K., & Novick, J.M. (2012). The benefits of executive control training and the implications for language processing. *Front Psychol*, 3, 1-14 doi: 10.3389/fpsyg.2012.00158
- Jolles D.D., van Buchem M.A., Crone E.A., Rombouts S.A. (2013) Functional brain connectivity at rest changes after working memory training. *Human brain mapping* 34: 396–406.
- Kaplan, C.A., & Simon, H.A. (1990). In search of insight. *Cognitive Psychology*, 22, 374-419.
- Kleibeuker, S. W., Koolschijn, P. C. M. P., Jolles, D. D., De Dreu, C. K. W., & Crone, E. A. (2013a). The neural coding of creative idea generation across adolescence and early adulthood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1–12.
- Kong. J., Kaptchuk, T.J., Webb J.M., Kong J.T., Sasaki Y., Polich G.R., et al. (2009). Functional neuroanatomical investigation of vision-related acupuncture point specificity—a multisession fMRI study. *Human Brain Mapping*, 30, 38–46.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M., & Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, 122, 981-991. 10.1093/brain/122.5.981.
- Kozhevnikov M., Kozhevnikov M., Yu C.J., and Blazhenkova O. (2013) Creativity, visualization abilities, and visual cognitive style. *British Journal of Educational Psychology*, 83, 196–209
- Kravitz, D.J., Saleem, K.S., Baker, C.I., Ungerleider, L.G., & Mishkin, M. (2013). The ventral visual pathway: an expanded neural framework for the processing of object quality. *Trends Cogn Sci*, 17, 26-49. doi: 10.1016/j.tics.2012.10.011.

- Kurtz, A.F., Leucht, S., & Lautenschlager, N.T. (2011). The clinical significance of cognition-focused interventions for cognitively impaired older adults: a systematic review of randomized controlled trials. *Int Psychogeriatr*, 23, 1364–1375. doi: 10.1017/S1041610211001001
- LeBoutillier N. et Marks D.F. (2003), Mental imagery and creativity: a meta-analytic review study. *British Journal of Psychology*, 94, 29-44.
- Likert, R., & Quasha, W.H. (1941). Revised Minnesota Paper Form Board. New York: Psychological Corporation.
- Luo, J., Li, W., Qiu, J., Wei, D., Liu, Y., & Zhang, Q. (2013). Neural Basis of Scientific Innovation Induced by Heuristic Prototype. *PlosOne*, 8, e49231. doi:10.1371/journal.pone.0049231.
- Luo, J., Niki, K., & Phillips, S. (2004). Neural correlates of the 'Aha! Reaction. *Neuroreport*, 15, 2013-2017.
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P.A. (2009). Aging, training, and the brain: a review and future directions. *Neuropsychol Rev*, 19, 504–522. doi:10.1007/s11065-009-9119-9.
- Malouin, F., Richards, C.L., Jackson, P.L., Dumas, F., & Doyon, J. (2003). Brain activations during motor imagery of locomotor-related tasks: a PET study. *Hum Brain Mapp*, 19, 47-62. doi: 10.1002/hbm.10103
- Martindale C. (1990), Creative imagination and neural activity, in K. G. Kunzendorf et A. A. Sheikh (Eds.), *The psychophysiology of mental imagery*. Amityville, NY: Baywood. pp. 89-108.
- Meinel, M., Wagner, T. F., Baccarella, C. V., & Voigt, K. (2018). Exploring the effects of creativity training on creative performance and creative self-efficacy: Evidence from a longitudinal study. *The Journal of Creative Behavior*. <https://doi.org/10.1002/jocb.234>.

- Menon, V., & Uddin, L.Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function. *Brain Struct Funct*, 214, 655– 667. doi: 10.1007/s00429-010-0262-0
- Metcalf, J., & Wiebe, D. (1987). Intuition in insight and noninsight problem solving. *Mem. Cogn*, 15, 238–246. doi: 10.3758/BF03197722
- Muchinsky, P.M. (2004). Mechanical aptitude and spatial ability testing. In. Thomas J.C., Hersen, M. (Eds), *Comprehensive Handbook of Psychological Assessment. Industrial and organizational assessment*, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, vol 4: pp 21-33. ISBN 978-0-471-41614-2.
- Murdock, M.C., Isaksen, S.G., & Lauer, K.J. (1993). Creativity training and the stability and internal consistency of the Kirton adaption-innovation inventory. *Psychological Reports*, 72,1123-1130.
- Ness, R.B. (2015). Promoting innovative thinking. *Am J Public Health*, 105, 114-118. doi: 10.2105/AJPH.2014.302365.
- Puccio G.J., Burnett C., Acar S., Yudess J.A., Holinger M., Cabra J.F. (2020) Creative Problem Solving in Small Groups: The Effects of Creativity Training on Idea Generation, Solution Creativity, and Leadership Effectiveness. *Journal of Creative Behavior*, 54, 453-471. doi.org/10.1002/jocb.381
- Qiu, J., Li, H., Jou, J., Liu, J., Luo, Y., Feng, T., et al. (2010). Neural correlates of « Aha » experiences: Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex*, 46,397-403. doi:10.1016/j.cortex.2009.06.006
- Radel R., Davranche K., Fournier M., Dietrich A. (2015) The role of (dis)inhibition in creativity: Decreased inhibition improves idea generation. *Cognition*, 134, 110-120. doi.org/10.1016/j.cognition.2014.09.001
- Raz, A., & Buhle, J. (2006). Typologies of attentional networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 367–379.

- Riou J, Guyon H, & Falissard B. (2016). An introduction to the partial least squares approach to structural equation modelling: a method for exploratory psychiatric research. *Int J Methods Psychiatr Res*, 25, 220-231. doi: 10.1002/mpr.1497.
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *Neuroimage*, 52, 1059-1069. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.10.003.
- Schaie, K.W. (1994). The course of adult intellectual development. *American Psychologist*, 49, 304-313.
- Schaie, K.W. (1996). *Intellectual development in adulthood: The Seattle Longitudinal Study*. New York, Cambridge University Press.
- Schaie, K.W. (2004). *Developmental influences on cognitive development: The Seattle Longitudinal Study*. New York, Oxford University Press.
- Schooler, J.X., Ohlsson, S., & Brooks, K. (1993). Thoughts beyond words: When language overshadows insight. *J Exp Psychol*, 122, 166-183. Doi: 10.1037/0096-3445.122.2.166.
- Scott G., Leritz L.E. & Mumford M.D. (2014) Types of creativity training: Approaches and their effectiveness. *Journal of creative behavior*, 38, 149-179.
- Shen, W., Luo, J., Liu, C., & Yuan, Y. (2013). New advances in the neural correlates of insight: A decade in review of the insightful brain. *Psychol Cog Sciences*, 58, 1497-1511. doi: 10.1007/s11434-012-5565-5
- Shen, W., Yuan, Y., Liu, C., Zhang, X., Luo, J., & Gong, Z. (2016). Is creative insight task-specific? A coordinate-based meta-analysis of neuroimaging studies on insightful problem solving. *Int J Psychophysiol*, 110, 81-90. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2016.10.001
- Squire L.R. (2014) Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82, 171–177. doi:10.1016/j.nlm.2004.06.005
- Stavridou A. and Furnham A. (1996) The relationship between psychoticism, trait-creativity and the attentional mechanism of cognitive inhibition. *Perrson. Individ. Diff*, 21, 143-153.

- Storm, B.C., & Angello, G. (2010). Overcoming fixation: Creative problem solving and retrieval-induced forgetting. *Psychological Science*, 21, 1263–1265.
- Sporns, O., & Honey, C.J. (2013). Topographic dynamics in the resting brain. *Neuron*, 78, 955-956. doi: 10.1016/j.neuron.2013.05.037.
- Utevsky, A.V., Smith, D.V., & Huettel, S.A. (2014). Precuneus is a functional core of the default-mode network. *J Neurosci*, 34, 932-940. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4227-13.2014.
- Takeuchi H., Taki Y., Sassa Y., Hashizume H., Sekiguchi A., Fukushima A., R Kawashima. (2011) Working memory training using mental calculation impacts regional gray matter of the frontal and parietal regions? *PloS One*, 6, e23175. doi:10.1371/journal.pone.0023175.
- Tik M., Sladky R., Luft C.D.B., Willinger D. Hoffmann A., Banissy M.J, Bhattacharya J., Windischberger C. (2018) Ultra-high-field fMRI insights on insight: Neural correlates of the Aha!-moment. *Human Brain Mapping*. 39, 3241-3252. DOI: 10.1002/hbm.24073
- Vally Z., Salloum L., AlQedra D., El Shazly S., Albloshi M., Alsheraifi S., Alkaabi A. (2019) Examining the effects of creativity training on creative production, creative self-efficacy, and neuro-executive functioning. *Thinking skills and creativity*, 31, 70-78. doi.org/10.1016/j.tsc.2018.11.003
- Watts, D.J., & Strogatz, S.H. (1998). Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*, 393, 440-442.
- Webb, M.E., Little, D.R., & Cropper, S.J. (2016). Insight Is Not in the Problem: Investigating Insight in Problem Solving across Task Types. 7, 1424. Doi: 10.3389/fpsyg.2016.01424.
- Weisberg, R.W. (2014). Toward an integrated theory of insight in problem solving. *Think. Reason*, 21, 5–39. doi: 10.1080/13546783.2014.886625

- Westerberg, H., Jacobaeus, H., Hirvikoski, T., Clevberger, P., Östenson, M. L., Bartfai, A., et al. (2007). Computerized working memory training after stroke – A pilot study. *Brain Injury*, 21, 21–29. doi: 10.1080/02699050601148726.
- Whitfield-Gabrieli, S., & Nieto-Castanon, A. (2012). Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks. *Brain Connect*, 2, 125-141. doi: 10.1089/brain.2012.0073.
- Wimmer, L. (2016). Problem solving as a sufficient condition of the creative process: A case for closer cooperation of creativity research and problem solving research. *Frontiers in Psychologie*, 7, 1-4. doi: 10.3389/fpsyg.2016.00488.
- Zhang, M., Tian, F., Wu, X., Liao, S., & Qiu, J. (2011). Neural correlates of “Aha!” effects in solving Chinese verbal problems: An event related-potential study. *Brain Res Bull*, 84, 210–214. doi 10.1016/j.brainresbull.2011.01.

Partie 2 : Application des processus créatifs pour la prise en charge du Traumatisme Crânien (TC)

Chapitre 1 : Revue de littérature sur le TC

Les pathologies cérébrales acquises, telles que les accidents vasculaires cérébraux, les traumatismes crâniens ou encore des tumeurs cérébrales, engendrent généralement des atteintes cognitives qui constituent des difficultés invalidantes même à très long terme. A celle-ci, s'ajoute souvent des perturbations émotionnelles et comportementales. L'impact de ces séquelles sur la vie quotidienne des patients compromet fortement la réinsertion sociale, familiale, scolaire et professionnelle des personnes touchées car elles ont besoin de se réadapter à des situations qui ne leur posaient pas de problèmes avant l'accident ou l'opération. Elles doivent alors développer des comportements alternatifs et compensatoires en plus de gérer une cognition défaillante. La notion de réadaptation est définie par l'OMS comme étant « l'usage combiné et coordonné de mesures médicales, sociales, éducatives et professionnelles pour entraîner ou réentraîner l'individu à atteindre son plus haut niveau de capacités fonctionnelles ». Aux vues de cette définition, nous pouvons facilement imaginer le nombre important d'intervenants et la diversité des approches que cela peut nécessiter. Nous savons que l'adaptation et la réadaptation dans le domaine de la santé, et particulièrement du handicap demande une importante capacité à faire face ainsi qu'une capacité à rebondir favorablement après une épreuve ou une maladie. Cette capacité nécessite de l'inventivité mais aussi de la sortie de cadre, des processus qui interviennent dans la créativité et qui ne sont pas voire peu stimulés dans les rééducations classiques, généralement centrées sur les déficiences cognitives. Comme nous l'avons vu plus haut, la créativité est sous-tendue par une grande diversité de facteurs cognitifs mais aussi environnementaux et procéduraux. C'est à cause de ces liens, que nous pensons que la créativité peut être un levier pour optimiser les effets de la réhabilitation, et que donc, une rééducation plus orientée vers la créativité devrait améliorer les performances cognitives des patients pris en charge mais aussi leur réinsertion socio-professionnelle ainsi que leur qualité de vie.

Dans ce contexte, nous avons choisi de nous intéresser à des patients traumatisés crâniens (TC) car les conséquences délétères de cette pathologie nécessitent de façon évidente une inventivité

et une capacité à sortir du cadre de la part des personnes touchées, ce qui en fait une population de choix pour proposer une rééducation centrée sur l'utilisation des ressources créatives de l'individu. En effet, un TC engendre fréquemment un syndrome dysexécutif persistant à long terme après le traumatisme, ainsi que de possibles modifications de sa personnalité.

I. Les patients TC

a) Incidence, épidémiologie et classification

Le TC est une problématique de santé publique de par le nombre de cas mais aussi les conséquences non négligeables sur le long terme. Pour autant, la dernière étude épidémiologique en France réalisée sur la région Aquitaine remonte à 1986 (Tiret et al., 1990). C'est en extrapolant les résultats de cette étude que l'on estime qu'aujourd'hui en France, il surviendrait environ 150 000 nouveaux cas par an. La prévalence est plus importante chez les jeunes adultes et les personnes âgées, et globalement, les hommes sont plus touchés que les femmes. Chez les jeunes adultes le TC est principalement dû à des accidents de la voie publique, alors que chez les sujets de plus de 60 ans il est principalement dû à des chutes.

Grâce à l'échelle de Glasgow, les TC sont répartis en 3 groupes de degré de sévérité du traumatisme : les TC légers (score à l'échelle de Glasgow entre 13 et 15), les TC modérés (score entre 9 et 12) et les TC graves (score entre 3 et 8). Le nombre de TC légers est d'environ 80%, les modérés de 10 à 15% et les TC graves concernent 5 à 10% des cas (Mathé et al., 2005; Vallat-Azouvi, 2019). Cette échelle de Glasgow se base sur l'état d'éveil et de réactivité du patient juste après le traumatisme. Cette classification peut être complétée par une autre, celle de la durée de l'amnésie post-traumatique (APT) qui comprend la phase de coma, la phase végétative et la phase de confusion et de désorientation. Plusieurs études ont montré que ces échelles sont assez prédictives du devenir du patient : ainsi plus l'échelle de Glasgow est basse et plus la durée de l'APT est élevée, plus le patient aura de séquelles et sa récupération sera compliquée et limitée (Connelly et al., 2006; Katz et al., 2015; Mazaux et al., 1997).

b) Séquelles cérébrales

La complexité du TC réside dans son hétérogénéité. Les séquelles constituent une pathologie à la fois neurologique et psychologique. Les séquelles cognitives sont principalement dues à des lésions focales et des lésions axonales diffuses. Les lésions focales sont dues à des hématomes cérébraux, ou des ischémies cérébrales, principalement causés par le choc de l'encéphale contre les parois du crâne. Elles sont facilement observables par IRM anatomique. Les lésions axonales diffuses sont causées par des forces d'accélération et de décélération brutales entraînant un cisaillement des fibres de la substance blanche (Johnson et al., 2013; Marquez de la Plata et al., 2011), notamment au niveau du corps calleux et des grands tracts dans les deux hémisphères (Kinnunen et al., 2011; Rutgers et al., 2008). Ces lésions diffuses peuvent être observées et mesurées en IRM de diffusion (DTI).

c) Séquelles cognitives

i) Le syndrome dysexécutif

Selon les régions cérébrales touchées par les lésions focales et diffuses, les troubles cognitifs peuvent être très variés. Les lésions touchent généralement le cortex préfrontal notamment dans des cas d'accélération/ décélération. Le cortex préfrontal est le centre des « fonctions exécutives » qui font référence à des fonctions de direction permettant, lors de la réalisation d'une tâche, de définir un but ou des objectifs à atteindre, de mettre en place une stratégie pour y parvenir et de contrôler sa mise en œuvre. Une atteinte de cette région cérébrale se traduit par un syndrome dysexécutif qui comprend notamment un déficit de l'inhibition, de l'attention divisée, une altération de la planification et des troubles de la flexibilité (Azouvi et al., 2017, 2004). Ce syndrome dysexécutif post-traumatique comporte un certain nombre de particularités. Il peut prendre tous les degrés de sévérité possibles. Il s'agit d'un déficit évolutif ayant tendance à s'améliorer avec le temps et la rééducation, parfois il faut de nombreuses années avant que le patient ne puisse récupérer une partie de ses capacités. Ce syndrome est associé à une atteinte cognitive plus globale, comprenant en particulier des déficits en mémoire de travail et d'attention, une lenteur cognitive,

une fatigabilité importante et parfois des troubles du langage ou des fonctions visuo-constructives (Vallat-Azouvi, 2019). Pour rappel, la mémoire de travail est une fonction essentielle à la réalisation de toute tâche, elle permet au sujet de maintenir accessibles des informations afin de pouvoir les manipuler, comme par exemple retenir plusieurs chiffres pour les additionner. Comme nous l'avons vu dans la Partie 1 (Chapitre 1, I.a.i) la mémoire de travail est sous-tendue par trois fonctions : la flexibilité, qui permet de passer d'une information à l'autre, la mise à jour pour effacer et remplacer une vieille information par une nouvelle et enfin l'inhibition qui évite de se focaliser sur des informations non pertinentes (Miyake et al., 2000). De plus, Engle et collaborateurs ainsi que Baddeley et collaborateurs, ont mis en évidence que le contrôle attentionnel est un élément clef de la mémoire de travail, il permet de maintenir ou supprimer des informations. Ainsi, ce contrôle attentionnel serait l'élément superviseur qui met en jeu l'une ou l'autre des trois sous-fonctions. (Baddeley and Della Sala, 1996 ; Baddeley, 2000 ; Randall W. Engle et al., 1999 ; Randall W Engle et al., 1999).

Outre ces troubles cognitifs, le TC est une pathologie qui peut conduire à des déficiences multiples comme des déficits moteurs, des déficits d'un ou plusieurs des cinq sens et des troubles neuropsychiatriques (dépression, anxiété, comportement violent, impulsivité, changement de personnalité). Les déficiences peuvent donc être physiques, cognitives et psychologiques.

ii) Le syndrome post-commotionnel

Les TC légers sont parmi les plus difficiles à déceler. En effet, généralement les TC légers ne présentent pas de symptôme immédiat et donc ils ne sont pas pris en charge. Une étude américaine, estime que seul 20 à 25% des patients TC légers sont hospitalisés et suivis (Katz et al., 2015). Cependant, malgré une absence de lésions manifestes, avec le temps, certains de ces patients vont développer des plaintes durables qui sont assez hétérogènes et qui ne sont pas spécifiques d'un traumatisme crânien. Elles peuvent être d'ordre physique (céphalées, vertiges, fatigue), cognitif (mémoire, attention) ou affectif (anxiété, dépression, troubles du sommeil), ce qui rend leur

identification encore plus complexe. On parle alors de syndrome post-commotionnel (SPC). Le SPC ne concerne pas que les TC légers, bien qu'ils soient la principale population touchée.

iii) Evolution de la pathologie

On peut observer chez les TC une évolution temporelle des symptômes qui se décline en trois phases. La première, la phase aigüe, correspond à la période entre l'accident et la stabilisation de l'état physique du patient. Durant cette période, le patient peut être dans le coma, il nécessite donc une surveillance permanente. Pour un TC grave, cette phase peut durer plusieurs semaines ou mois. La seconde, la phase subaigüe, est la période pendant laquelle le patient retrouve progressivement un état d'éveil. Cette période peut être plus ou moins longue en fonction de la sévérité du TC et dépend de la durée du coma. Elle peut durer plusieurs mois. Lors de ces deux phases, il existe des phénomènes de récupération spontanée qui dépendent de la plasticité cérébrale mais aussi de la réserve cognitive propre à chaque patient (Dennis et al., 2007). La phase subaigüe se termine lorsque tous les phénomènes de récupération spontanée sont arrivés à leur terme. A ce moment-là, les déficits observés chez le patient sont stables, on parle alors de phase chronique. De façon générale, les patients sont considérés comme chroniques au bout de 2 ans. Lors de cette phase, les TC se répartissent en deux types : les TC dont les déficits chroniques sont apparents et ceux pour qui les déficits sont masqués par des comportements compensatoires. On parle alors « d'handicap invisible ». Dans ce dernier cas, le patient TC semble avoir récupéré mais certaines difficultés persistent de façon insidieuse. On lui attribue alors une certaine mauvaise volonté lorsqu'il échoue à une tâche alors qu'en réalité, il a des difficultés à la gérer. Ce handicap invisible est d'autant plus présent chez les TC légers qui compensent leurs troubles plus facilement que les patients modérés ou graves. Cependant cette compensation constante a un coût cognitif et les fatigue rapidement, ce qui les rend donc cognitivement moins endurants que des sujets sains. C'est dans ce contexte d'handicap invisible qu'il est important d'améliorer la prise en charge du TC afin d'améliorer sa qualité de vie.

Le peu d'attention portée à cette pathologie, aussi bien par la société que par les dirigeants, est surprenant compte tenu des répercussions dramatique qu'elle peut avoir sur la vie quotidienne des patients à long terme (Vallat-Azouvi, 2019). Or, de nombreuses études longitudinales ont montré que la réinsertion de ces patients était assez compliquée à cause de la chronicité des déficits. Seule la moitié des patients retrouvent un travail dans les années qui suivent leur traumatisme (Draper and Ponsford, 2008; Mazaux et al., 1997). De plus, l'étude de Jourdan et collaborateurs (2016) visant à montrer l'évolution de 245 patients 4 ans après un TC grave, a démontré que 79% de ces patients sont indépendants dans les tâches quotidiennes et que 40 à 50% des patients interrogés ont besoin d'aide pour les activités externes et l'organisation. D'un point de vue cognitif, seuls 28% des participants ont eu une bonne récupération. Par ailleurs, ils ont également démontré que ces déficits étaient accompagnés de séquelles psychologiques, 43% des patients présentaient 4 ans après le traumatisme de l'anxiété et 25% de la dépression. De plus, plusieurs études menées sur les personnes SDF, ont montré qu'environ 50% d'entre eux ont eu un traumatisme crânien au cours de leur vie (Oddy et al., 2012; To et al., 2015), ce qui tend à confirmer les difficultés de réinsertions socio-professionnelles des patients.

Ces résultats combinés appuient le faible de taux de réinsertion des patients. Le TC se traduit donc à court comme à long terme par un syndrome post-commotionnel et dysexécutif qui regroupent des symptômes d'ordre physique, cognitif et psychologique. Ces syndromes ont pour conséquence une désocialisation progressive des patients qui se sentent souvent incompris et abandonnés, à la fois par leurs proches et par les institutions médicales. Ils entraînent également, des difficultés à la réinsertion professionnelle qui va renforcer la désocialisation du TC, participant à un isolement progressif. Il est donc primordial de trouver une solution pour permettre aux patients de retrouver une vie sociale active et de faciliter leur réinsertion professionnelle afin d'améliorer leur qualité de vie à long terme.

II. Rééducation

La réinsertion des patients TC implique une récupération de leurs aptitudes cognitives. Cette récupération passe par une rééducation qui vise à entraîner ou réentraîner le patient TC à atteindre son plus haut niveau de capacités fonctionnelles.

a) Bilan d'évaluation

Afin de proposer une prise en charge adaptée, il est important d'effectuer un diagnostic de rééducation le plus complet possible pour caractériser finement le profil cognitif du patient, d'une part, pour mettre en place une rééducation ciblée sur la totalité des troubles et, d'autre part, pour évaluer et suivre les effets de la rééducation. Au vu de l'hétérogénéité des troubles du TC, disposer d'un bilan complet et sensible est indispensable afin de mettre en évidence l'ensemble de ses déficiences dans le cadre d'un diagnostic pré-rééducation.

i) Tests de routine

Nous l'avons vu le TC est une pathologie complexe, aux déficits cognitifs multiples et variés qui sont fonction des zones cérébrales atteintes. A l'heure actuelle, le bilan cognitif du TC est effectué à l'aide de tests neuropsychologiques normés, qui ciblent spécifiquement les capacités mnésiques, attentionnelles et exécutives du patient.

La mémoire peut être fortement impactée lors d'un TC, avec notamment l'apparition d'amnésie rétrograde ou antérograde (DePalma, 2015). De plus, comme nous l'avons vu le syndrome dysexécutif se caractérise par une atteinte des aires préfrontales induisant des difficultés en mémoire de travail. Parmi les tests neuropsychologiques les plus couramment utilisés pour évaluer les capacités mnésiques on retrouve ceux issus de deux batteries : la Batterie d'Évaluation de la Mémoire (BEM) et l'échelle d'intelligence de Wechsler (WAIS) (voir *annexe 1* pour plus de détails).

De même, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, les capacités attentionnelles qui sous-tendent entre autres la mémoire de travail, sont fortement impactées lors

d'un traumatisme. De plus, les syndromes dysexécutif et post-commotionnel engendrent un état de fatigue chronique chez les patients, impactant leur état d'alerte à court comme à long terme, ce qui va nécessairement entraîner des déficiences dans toute la sphère cognitive. Il est donc essentiel de pouvoir mesurer et identifier les déficits attentionnels des patients afin d'orienter au mieux leur rééducation (voir *annexe 2* pour une présentation détaillée des principaux tests attentionnels).

Le TC induit un syndrome dysexécutif révélateurs de lésions frontales, impactant donc les fonctions exécutives dont la planification, l'inhibition ou le raisonnement. Dans un contexte professionnel ces fonctions sont essentielles à la bonne réalisation de son travail, en plus évidemment de la mémoire et de l'attention. Ainsi pour prendre la mesure du handicap réel de l'individu il est nécessaire de mesurer correctement l'ensemble de ces troubles et de bien choisir les tests utilisés afin de n'omettre aucune information qui pourrait être pertinente (voir *annexe 3* pour une présentation détaillée des principaux tests exécutifs).

Les tests neuropsychologiques qui sont actuellement proposés permettent de mesurer des déficits principalement dans un contexte cognitif unimodal. Cependant, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, le TC induit également des cisaillements de fibres et donc une mauvaise communication entre les différentes régions engendrant des déficiences plus complexes qu'il est difficile d'appréhender. De plus, chez des patients en stade chronique, il existe des phénomènes de compensation qui mettent à contribution les fonctions préservées pour pallier les déficits et nous pensons que cette compensation peut contribuer à masquer les difficultés des patients jusqu'à une certaine mesure.

Il est alors important d'utiliser des tests qui seront capables d'appréhender les déficiences cognitives dans un contexte complexe d'interaction des processus cognitifs. De tels tests répondront davantage aux situations réelles rencontrées par le patient TC dans son quotidien et seront plus à même de démystifier les phénomènes de compensation. En ce sens, ces tests seraient plus adaptés pour les patients en phase chronique.

ii) Tests développés au laboratoire

Dans cette optique nous avons développé deux tests qui pourraient permettre de mettre en évidence un déficit de fonctionnement complexe et/ou d'autres types de déficits non évalués en routine (ces tests sont détaillés dans *l'annexe 4*).

Le test d'Attention Focalisée Visuo-Spatiale (**AFVS**) : Cette tâche nécessite la mise en œuvre de plusieurs processus et mécanismes cognitifs qui sont recrutés progressivement du sous-test 1 au sous-test 4. Ainsi, chaque sous-test correspond à un niveau de difficultés différent allant du plus simple au plus complexe. Le sous-test 1 (niveau 1) évalue la flexibilité attentionnelle. Le sous-test 2 (niveau 2) sur la base du sous-test 1, évalue l'attention focalisée visuo-spatiale. Le sous-test 3 (niveau 3) est conçu sur la même base que le sous-test 2 mais nécessite une charge de mémoire à court terme supplémentaire. Enfin, le sous-test 4 (niveau 4), sur la base du sous-test 3, introduit une notion de planification et d'anticipation. Ainsi, les processus progressivement recrutés sont la flexibilité attentionnelle, l'attention sélective visuospatiale, les mécanismes de désengagement et de réengagement, la mémoire à court terme, la mise à jour, la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur la planification et l'anticipation. L'avantage de ce test est qu'il évalue différentes fonctions cognitives non pas isolément mais dans un contexte plus complexe qui est plus représentatif des interactions cognitives mises en œuvre lors de situations de vie quotidienne. En effet, alors qu'une fonction cognitive peut ne pas être déficitaire dans une situation simple, elle peut le devenir si la situation se complexifie.

Le second test que nous avons mis au point consiste en une vidéo montrant comment **réaliser un nœud** (*Réalisation : P. Gauthier, DR, UMR 7260*). Cette tâche repose sur un apprentissage mental de séquences sensori-motrices via la mobilisation des capacités de mémoire à court-terme et d'imagerie mentale mais également d'inhibition. Afin d'être correctement réalisée, cette tâche nécessite une grande attention sélective. En effet certaines étapes sont importantes à la réalisation du nœud, d'autres pas. Un sujet peut alors réaliser le nœud sans avoir mémorisé la totalité des

étapes mais seulement celles qu'il juge nécessaires. Dans ce cas, on met en évidence que le sujet est capable de discriminer les étapes pertinentes à la bonne réalisation du nœud et donc de sélectionner l'information essentielle à la réussite de la tâche, ce qui dénote une bonne attention sélective associée à une bonne mémoire sélective. A l'opposé, certains sujets peuvent avoir mémorisé de nombreuses étapes mais totalement négligé la ou les étapes nécessaires à la réussite de la tâche, ce qui caractérise dans ce cas un manque de sélectivité mais une mémoire relativement correcte. L'avantage de cette tâche est également de mettre en relation un apprentissage mental et donc une mémorisation d'images mentales avec une restitution sensori-motrice de l'information puis sémantique. Ainsi, en plus de l'attention sélective, cela nous donne une information sur la capacité du sujet à restituer l'information selon deux modalités différentes.

iii) Les images ambiguës

Enfin, comme nous l'avons vu, la capacité à sortir du cadre est une faculté importante chez les patients TC pour les aider à faire face à leurs déficits au quotidien. Dans ce cadre nous avons voulu évaluer cette prédisposition au niveau perceptif, et avons utilisé pour cela des images ambiguës ou dites « **d'illusion d'optique** » qui comportent des

Exemple d'image ambiguë



images cachées. Elles nous ont permis d'évaluer la flexibilité mentale reposant sur des processus d'encodage sélectif et de désinhibition- inhibition dans un cadre perceptif. Pour les scènes présentées le sujet doit être capable spontanément de porter son attention à la fois sur les éléments saillants tels que le paysage, que sur des éléments discrets comme trouver de l'information dans le vide. Ce test permet l'étude de la flexibilité mentale dans un contexte perceptif. De plus, les processus mis en jeu dans cet exercice semblent similaires à ceux qui permettent l'adoption d'un nouveau point de vue dans la résolution de problème (pour plus de détail voir l'annexe 4).

b) Rééducations

La rééducation d'un TC doit faire face à la diversité des déficits observés. Deux principales approches sont recensées dans la rééducation cognitive du TC : la rééducation standard et la rééducation holistique (Cattelani et al., 2010). Dans leur revue de mise à jour sur les effets de la rééducation holistique après TC, Rohling et collaborateurs (2009) et Cicerone et collaborateurs (2011) rapportent des effets bénéfiques pour les deux approches. Toutefois ces effets ne s'expriment pas sur les mêmes plans selon l'approche considérée.

i) Rééducation Standard

La première approche est centrée sur les dysfonctionnements cognitifs et se focalise sur l'entraînement d'activités basiques (attention, mémoire, fonctions exécutives), l'acquisition d'habiletés et le développement de stratégies d'apprentissage et de réapprentissage. En effet, il est actuellement clairement établi que l'entraînement cognitif améliore le fonctionnement mental de l'individu (Westerberg and Klingberg, 2007). Cela a été également montré par des travaux issus du laboratoire qui ont évalué les effets d'un entraînement de la mémoire et de l'attention chez une population de sujets âgés sains (Chambon et al., 2014; Chambon and Alescio-Lautier, 2019), de sujets atteints de déficits cognitifs légers (Herrera et al., 2012), de patients atteints de la maladie d'Alzheimer en phase débutante (Alescio-Lautier et al., 2019) et de patients TC en phase chronique (plus de 10 ans après leur trauma, étude de 4 cas, article en préparation). S'agissant des fonctions exécutives, Hussey et Novick (2012) ont rapporté que leur entraînement améliorerait le processus langagier. Enfin, d'autres études ont montré que l'entraînement de l'attention soutenue à travers la méditation (Tang and Posner, 2009) et l'entraînement musical (Kraus and Chandrasekaran, 2010) améliorerait différentes habiletés cognitives parmi lesquelles le contrôle attentionnel.

Des bénéfices ont également été rapportés à la suite d'un entraînement centré sur le fonctionnement exécutif chez des TC sévères, qui sont par exemple devenus plus rapides et plus précis dans des situations de double tâche après un entraînement de l'attention divisée (Couillet et

al., 2010), et ont présenté une amélioration de la gestion centrale de leur mémoire de travail après un entraînement cognitif spécifique (Vallat-Azouvi and Pradat- Diehl, 2009).

Cependant, malgré les bénéfices observés, nous avons aussi montré qu'à un certain stade de notre entraînement de la mémoire et de l'attention un palier est atteint et que les sujets TC ou âgés n'acquièrent plus de nouvelles habiletés transférables à la vie de tous les jours (Chambon et al., 2014; Chambon and Alescio-Lautier, 2019; Herrera et al., 2012). Ainsi, le seul entraînement de la sphère cognitive ne semble donc pas suffisant pour favoriser un transfert des bénéfices dans des situations de vie quotidienne. A titre d'exemple, un effet bénéfique est obtenu à la suite d'un entraînement de l'attention avec cependant des effets limités dans l'amélioration des activités de tous les jours. Si la nécessité d'un entraînement direct de l'attention n'est pas remise en doute (Pero et al., 2006), l'association avec un entraînement sur la métacognition est préconisée afin de promouvoir des stratégies de compensation généralisables à des tâches réelles de vie quotidienne.

ii) Rééducation holistique

La seconde approche recensée dans la rééducation cognitive du TC consiste en une rééducation holistique et multidisciplinaire orientée sur le développement de comportements alternatifs et compensatoires au lieu de se centrer uniquement sur le dysfonctionnement cognitif comme le font généralement les interventions de remédiation traditionnelles. Cette approche peut s'appuyer sur des facteurs cognitifs, psychologiques, émotionnels et environnementaux.

Dans cet esprit, l'hôpital d'instruction des armées (HIA) a créé la cellule de réadaptation et de réinsertion du blessé en opération (C2RBO). Son but est de traiter les séquelles physiques mais aussi psychiques des soldats blessés en opérations en s'adaptant à chaque cas. Ce programme repose sur une collaboration interdisciplinaire incluant différents acteurs : des médecins, des psychologues, mais aussi des acteurs sociaux qui accompagnent les patients pour une meilleure réinsertion sociale et professionnelle (de Montleau and Lapeyre, 2013).

Dans le civil, ce type de rééducation reste très peu utilisée en dehors de structures pilotes, les centres rééducatifs se focalisent principalement sur les aspects cognitifs et physiques lorsqu'il y a des atteintes. Des acteurs sociaux tels que les Service d'Accompagnement Médico-Social pour Adultes Handicapés (SAMSAH) aident également les patients au quotidien, en leur offrant des espaces d'activités conviviales, des formations professionnalisantes (Unité d'Evaluation de Réentraînement et Orientation Sociale ; UEROS) et en les mettant en lien avec des services d'aides à la personne ou des médecins. Cependant, pour y avoir accès les patients doivent effectuer des démarches pour être reconnus handicapés, une étiquette lourde à porter. C'est une étape difficile à franchir pour beaucoup d'entre eux, car accepter le handicap, c'est renoncer à l'espoir de retrouver une vie normale. Une fois sorti du cadre hospitalier, il appartient à chaque patient de poursuivre une prise en charge en dehors de l'hôpital avec des neuropsychologues, psychologues ou encore orthophonistes. Pour ceux qui ont la chance de pouvoir s'appuyer sur des proches, la transition entre l'hôpital et la vie quotidienne se fait un peu plus facilement mais au détriment de l'aidant qui remplace la structure médicale. Pour les patients isolés, ce changement peut être extrêmement abrupt, passer d'une structure qui les accompagne et les soutient au quotidien, et se retrouver du jour au lendemain seuls face aux problèmes de la vie est un grand écart difficile à réaliser. Cependant, malgré une certaine abondance de littérature sur la rééducation du TC, il n'existe pas de données montrant de façon claire un transfert des bénéfices de l'entraînement à la vie quotidienne.

Dans ce contexte, et à la suite des résultats que nous avons obtenus lors de l'étude 2 (Partie 1, Chapitre 3), nous pensons qu'il faudrait favoriser la mise en place d'une rééducation holistique basée sur la créativité, pour optimiser la prise en charge du patient TC. D'après le modèle de Lubart et collaborateurs (2003), le point commun entre tous les facteurs qui englobent la prise en charge holistique serait le potentiel créatif. C'est pour cette raison que nous pensons que stimuler le

potentiel créatif dans le cadre d'une rééducation holistique permettrait un transfert des bénéfices dans la vie quotidienne des patients et ainsi favoriser leur réinsertion, sociale et professionnelle.

Chapitre 2 : Revue de littérature sur la créativité et les TC

Nous avons vu que le TC pouvait induire un syndrome dysexécutif ainsi qu'un syndrome post-commotionnel qui se traduisent par des déficits cognitifs touchant la mémoire, le raisonnement, la planification, l'attention, mais également par des troubles de l'affect et psychologique. Ces déficits entraînent une désocialisation du patient, or nous avons vu que ces différents facteurs sont importants pour la créativité. Or, à notre connaissance, la littérature sur la créativité chez les TC est quasiment inexistante, seuls trois articles ont exploré les relations entre la créativité et les patients TC. Pourtant, la créativité est nécessaire pour trouver de nouvelles stratégies compensatoires et faire face aux problèmes de la vie quotidienne. Elle repose à la fois sur des processus de pensée divergente et de pensée convergente. Rigon et collaborateurs (2020, 2018) ont étudié chacune de ces deux pensées chez un groupe de 29 TC appareillés avec un groupe contrôle. Pour leur première étude en 2018, ils ont évalué la capacité des participants à utiliser leur pensée convergente grâce au RAT. Pour leur deuxième étude de 2020, ils ont testé la pensée divergente des patients grâce à deux tests, l'AUT et la version pour adulte du test de Torrance, l'ATTA. De plus, pour chacune de ces deux études, les auteurs, ont évalué les performances de mémoire, d'attention et de fonctions exécutives des participants à travers différents tests neuropsychologiques classiques. Les résultats de l'étude de 2018 sur la pensée convergente ont démontré que, non seulement les patients TC produisaient significativement moins de réponses correctes, mais qu'en plus leur performance au RAT étaient corrélées à leur capacité d'apprentissage et de mémoire. Pour les auteurs, cela confirme l'association entre la mémoire déclarative et la créativité (Abraham et al., 2014; Madore et al., 2015). En revanche, lors de leur seconde étude sur la pensée divergente, ils n'ont trouvé aucun déficit ni à l'AUT ni à l'ATTA, malgré des déficits sur certaines tâches neuropsychologiques. Alors que l'ATTA ne montre aucune corrélation avec aucun test neuropsychologique testé, les performances à l'AUT sont, elles, corrélées significativement à la mémoire. Les auteurs en concluent que la pensée divergente étant épargnée lors d'un TC, elle doit reposer sur des mécanismes différents de la pensée convergente et devrait donc être exploitée dans de futures rééducations.

Pour finir, Haller et collaborateurs (2017) ont étudié le lien entre la créativité des proches des patients et l'évolution de leur récupération sur les plans émotionnel, interpersonnel, cognitif et global. Ils ont testé 176 TC sévères à 3 mois, 6 mois et 12 mois du traumatisme ainsi que leurs proches. Ils les ont divisés en deux groupes d'âge : inférieur à 50 ans et supérieur à 50 ans. Ils ont démontré qu'il n'y avait pas de corrélation chez les patients entre la créativité et le fonctionnement sur chacun des plans. En revanche, ils ont observé qu'au cours du temps pour l'ensemble des groupes de patients il y a une diminution du fonctionnement interpersonnel sauf pour le groupe des patients âgés de plus de 50 ans, qui présente une augmentation corrélée à la créativité des proches. De plus, chez ces mêmes sujets, la créativité des proches est corrélée au fonctionnement global et cognitif des patients. Les auteurs en déduisent que les proches ont un rôle crucial dans le suivi des patients et qu'ils doivent être impliqués dans les rééducations proposées aux patients.

Bien que très limitée, la littérature qui s'intéresse à l'impact du TC sur la créativité encourage à intégrer les processus créatifs dans une rééducation holistique afin d'optimiser la récupération des patients.

Chapitre 3 : Expérimentations

Holistic rehabilitation based on creativity in brain injured patients: 3 case studies

Deshayes C., Minet A., Chambon C., Alescio-Lautier B.

En préparation

Les patients Traumatisés Crâniens (TC) présentent de nombreux troubles cognitifs qui souvent persistent en phase chronique. Les rééducations cognitives classiques ne permettent pas une réinsertion socio-professionnelle optimale des patients, puisque seule la moitié d'entre eux retrouve une activité professionnelle. Les rééducations holistiques semblent plus adaptées pour cette pathologie très hétérogène. Ainsi, le but de cette étude est d'évaluer les effets d'une rééducation holistique centrée sur la créativité, afin de mettre en évidence des modifications au niveau cognitif et anatomique.

Méthode : Nous avons développé un programme de rééducation ciblant trois aspects : cognitif, créatif et émotionnel, abordés grâce à un très large panel d'exercices lors de chacune des 40 séances d'entraînement (1h30 / semaine pendant 1 an). Nous avons rééduqué 3 patients TC en phase chronique se situant à 2 ans, 9 ans et 23 ans de leur trauma. Chacun a effectué un bilan pré- et post-entraînement comprenant des tests cognitifs (mémoire, attention et exécutifs), créatifs et une séance d'IRM en tenseur de diffusion afin d'acquiescer d'évaluer les atteintes possibles de la matière blanche, grâce aux mesures de diffusivité axiale (AD), radiale (RD), moyenne (MD) et de la fraction d'anisotropie (FA).

Résultats : Les résultats préliminaires obtenus chez ces 3 patients indiquent des améliorations cognitives globales sous-tendues par des modifications anatomiques. Néanmoins, les effets de la rééducation diffèrent selon le délai post-traumatique, tant sur le plan cognitif qu'anatomique. Pour le patient se situant à 2 ans post-trauma, la partie cognitive de la rééducation a été la plus efficace, en revanche, le travail sur la gestion émotionnelle et la métacognition se sont avérées plus complexes à mettre en place. Concernant les données anatomiques, il présente une amélioration globale de l'intégrité de la substance blanche nettement visible par la valeur de FA. Pour les deux patients plus éloignés de leur trauma (9 et 23 ans) les trois aspects ciblés par la rééducation ont pu être améliorés. Et ces bénéfices s'accompagnent de changements fins principalement mis en évidence par une normalisation de la diffusivité axiale au niveau de tractus impliqué dans la gestion émotionnelle et les processus de mémoire liés à la créativité.

Discussion : Suite à ces résultats, nous pensons que notre rééducation holistique est parfaitement adaptable aux différents profils d'atteintes que l'on peut rencontrer dans la population de TC en phase chronique. Nous avons également pointé la possible existence d'une période charnière où le patient retrouverait une stabilité de sa réserve cognitive et une capacité suffisante d'introspection et de gestion de ses troubles pour assurer une prise en charge holistique réussie. Enfin, nous avons mis en évidence que pour des patients en phase chronique, l'AD est beaucoup plus sensible aux évolutions de l'intégrité de la matière blanche et devrait être utilisée en clinique pour un meilleur suivi des patients.

Holistic rehabilitation based on creativity in brain injured patients: 3 case studies

Deshayes C., Minet A., Chambon C. and Alescio-Lautier B.

Abstract

Patients with traumatic brain injury (TBI) present numerous cognitive disorders that often persist in chronic stage. Conventional cognitive rehabilitation does not allow an optimal socio-professional reintegration of the patients, as only half of them return to a professional activity following their trauma. Holistic rehabilitations seem more adapted for this very heterogeneous pathology. Thus, the aim of this study is to evaluate the effects of a holistic rehabilitation focused on creativity, in order to highlight changes at the cognitive and anatomical level.

Method: We have developed a rehabilitation program targeting three aspects: cognitive, creative, and emotional, approached through a very large panel of exercises during each of the 40 training sessions (one session of 1h30 per week for 1 year). We trained 3 TBI patients in chronic stage at 2 years, 9 years, and 23 years of their trauma. Each patient completed a pre- and post-training assessment including cognitive tests (memory, attention and executive), creative tests and a diffusion tensor MRI session in order to evaluate possible damage to the cerebral white matter, i.e. measurements of mean, axial and radial diffusivity (MD, AD, RD) as well as anisotropy fraction (AF).

Results: Preliminary results obtained in these 3 patients indicate global cognitive improvements underpinned by anatomical modifications. Nevertheless, the effects of rehabilitation differ according to the post-traumatic delay, both cognitively and anatomically. For the patient at 2 years post-trauma, the cognitive part of the rehabilitation was the most effective, whereas the part dealing with emotional control and meta-cognition seemed to be more complex to implement. Concerning the anatomical data, it shows an overall improvement in the integrity of the white matter clearly visible by the AF value. For the two patients further away from their trauma (9 and 23 years) the three aspects targeted by the rehabilitation were improved. And these benefits are accompanied by specific changes mainly highlighted by a normalization of axial diffusivity at the level of the tract involved in emotional management and memory processes related to creativity.

Discussion: Based on these results, we believe that our holistic rehabilitation is perfectly adaptable to the different impairment profiles that can be encountered in the population of chronic TBI. We also pointed out the possible existence of a critical period when the patient would regain a stable cognitive reserve and a sufficient capacity for introspection and management of his disorders to ensure successful holistic management. Finally, we highlighted that for patients in chronic stage, AD is much more sensitive to changes in white matter integrity and should be used in clinics for better patient follow-up.

Introduction

Traumatic brain injury (TBI) is a public health issue, and it is estimated today that there are approximately 150,000 new cases per year in France. The complexity of TBI lies in the heterogeneity of both the trauma itself and the after-effects that make it a neurological and a psychological pathology. Despite the importance of this pathology, which can have long-term repercussions on the social and professional life of patients, it can be considered a neglected pathology (Vallat-Azouvi, 2019). Longitudinal studies have shown that the reintegration of patients is complicated because of the chronicity of their deficits and that only half of the patients return to work in the years following their trauma (Draper and Ponsford, 2008; Mazaux et al., 1997).

To enable TBI patients with chronic disorders to reintegrate, in addition to their potential physical impairments that may handicap them, they need to regain a good level of cognitive skills. This cognitive recovery requires management aimed at training or re-training the TBI patient to reach his or her highest level of functional abilities. Two types of rehabilitation can currently be distinguished: cognitive rehabilitation (classical) and holistic rehabilitation. The first focuses on cognitive dysfunctions, and training consists of activities targeting the affected cognitive functions (attention, memory, executive functions), skill acquisition and the development of learning and relearning strategies (Westerberg et al., 2007). The second approach consists of a holistic rehabilitation oriented towards the development of alternative and compensatory behaviors, instead of focusing on cognitive dysfunction as the first one does. It can be based on cognitive, psychological, emotional, and environmental factors, depending on the patient's needs. Interestingly, the common point between these four factors is the creative potential of the patient (Lubart et al., 2003). However, creativity is an essential function in the TBI problematic, which sometimes must reinvent itself totally in order to be able to face again the difficulties of everyday life.

The sequelae suffered by TBI patients are mainly due to focal brain lesions and diffuse axonal injuries. The first ones are due to cerebral hematomas, or cerebral ischemia, mainly caused by the impact of the brain against the lining of the skull and are easily observable in an anatomical MRI scan. The latter are caused by abrupt acceleration and deceleration forces resulting in shearing of the white matter fibers (Johnson et al., 2013; Marquez de la Plata et al., 2011), especially in the corpus callosum and the major tracts in both hemispheres (Kinnunen et al., 2011; Rutgers et al., 2008). These diffuse lesions can be observed and measured in Diffusion MRI (DTI) using several measurements, the best known being the fraction of anisotropy (FA) which

reflects the integrity of the white matter fibers. We can also analyze the mean diffusivity (MD) which measures the amplitude of the diffusion of water molecules in a voxel, the axial diffusivity (AD) which is proportional to the axonal damage and the radial diffusivity (RD) which is inversely proportional to the demyelination (Feldman et al., 2010; Rodrigo et al., 2008). In chronic TBI patients, it has been shown that there is an increase in MD, AD and RD values and a decrease in AF value. (Kraus et al., 2007). The diversity of the regions affected by focal and diffuse lesions means that cognitive disorders can be very varied, but the majority of lesions are observed in the prefrontal cortex, which is the center of executive functions. This is why TBI is considered as " the pathology " associated with a dysexecutive syndrome, including cognitive deficits such as inhibition, divided attention and flexibility disorders (Azouvi et al., 2004, 2017), but also behavioral problems such as violent behavior, impulsivity or personality changes. This syndrome can have any degree of severity, and especially sometimes it can take many years before the patient recovers just a part of his or her abilities. This syndrome is also associated with a more global cognitive impairment, especially attentional and working memory deficits, cognitive delay, significant fatigability and, more rarely, language or visuo-constructive function disorders (Vallat-Azouvi, 2019). It should be emphasized here that working memory, which allows information to be maintained for manipulation, is an essential function for the completion of any task, but also for creative processes. According to the model of Miyake and collaborators (2000), it is underpinned by three functions: 1) flexibility, which allows our attentional focus to shift from one information to another, 2) updating, which refreshes the content of our working memory, and 3) inhibition, which allows us to ignore information that is not relevant to the task. The attentional control is also a key element of the working memory, because it allows to maintain or delete information (Baddeley, 2000; Baddeley and Della Sala, 1996; Engle, Kane, et al., 1999; Engle, Laughlin, et al., 1999). Furthermore, TBI can also result in a post-concussive syndrome (PCS) which includes physical (motor or bone disorders), physiological (sleep disorders, chronic fatigue, headaches, etc.) and neuropsychiatric disorders (depression, anxiety, etc.). The symptoms of a TBI patient are therefore very often present in the form of a mosaic of physical, cognitive, and psychological impairments, accentuating the daily handicap and making the care all the more complicated.

In this context, we have selected three chronic TBI patients with different post-traumatic delays, namely 2, 9 and 23 years, and proposed them a holistic rehabilitation focused on creative processes, in order to optimize their cognitive recovery and hopefully facilitate their social and professional reintegration. We

assume that this rehabilitation will lead to cognitive changes underpinned by changes in the cerebral white matter visible in diffusion tensor imaging. The proposed rehabilitation targets three aspects: cognitive, creative and emotional. Its effects have been evaluated by comparing subjects' performance obtained during a pre- and post-training assessment that includes cognitive tests (memory, attention, and executive functions), psychological questionnaires and an MRI session for diffusion data acquisition. Given the heterogeneity of our subjects, we chose to study each one as a case study.

Material and Method

Patients

Participants were recruited as part of a clinical trial: CREADAP-TC (Adaptative creativity and cognitive rehabilitation of traumatic brain injury patient: exploratory study or in French « Créativité adaptative et réhabilitation cognitive du patient traumatisé crânien: étude exploratoire »). The promoter is the DCSSA (Central directorate of the armed forces health service) and the coordinating investigators are M.H. Ferrer for IRBA (Armed Forces Biomedical Research Institute) and B. Alescio-Lautier for the LNSC (Sensory and Cognitive Neuroscience Laboratory). Thirteen patients were recruited in chronic stage (at least 2 years after the trauma). We would like to present here the 3 patients who carried out the holistic rehabilitation we developed and who reached the end of the protocol (*Table 1*).

Table 1: Characteristics of participants at the inclusion stage

Patient	Gender	Age	Education	Severity	Post-lesioned delay	Age at the trauma moment
<i>011</i>	F	38 years	17 years	Moderate	23 years	15 years old
<i>012</i>	M	34 years	10 years	Severe	2 years	32 years old
<i>013</i>	M	41 years	17 years	Moderate	9 years	32 years old

History of the patient *011*

This patient suffered a traffic accident as a pedestrian in 1994, when she was 15 years old, resulting in a concussion with a shock to the right lateral side of the skull followed by a loss of consciousness for about ten minutes. The forced rotation of the head caused a rupture of the pituitary stem resulting in pituitary insufficiency (*hydrocortisone* treatment). Because the accident occurred in a foreign country, we were unable

to access the original medical records. The patient presents violent chronic headaches associated with neurovegetative comital crises. An MRI investigation dating from 2013 shows no morphological or signal abnormalities or hemorrhagic lesions. The neuropsychological assessment of the same period did not detect any cognitive deficit, however, the patient complains of chronic fatigue, disturbance of attention and executive functions, especially planning, as well as motor difficulties (appreciation of distances and lack of fluidity in movements). As a result of her head injury and the resulting hormonal problems, the patient had to end her law school studies and took several short-term contracts before beginning make-up training. Since December 2014, she has been on sick leave and is facing difficulties in her social and professional reintegration.

History of the patient 012

Patient 012 suffered a high-speed scooter accident on December 30, 2015, at the age of 32. The patient's initial diagnosis was a Glasgow score of 4 and after 2 weeks in a coma, the patient had retrograde amnesia which still persists to this day, as well as right hemiplegia which is partially recovered. At the anatomical level, an initial MRI investigation in December 2015 showed spontaneous hyperdensities of the convexity grooves in the bilateral apical posterior frontal region and above the corpus callosum. As well as hyperdensity at the level of the Sylvius aqueduct and the fossa of the brain. There are also bilateral fronto-temporal intra-parenchymal petechiae predominating at the level of the right thalamus in terms of number and density. A diffusion tensor MRI was performed one week later and shows diffuse axonal lesions in the splenium of the corpus callosum, right thalamus, anterior and superior nuclei of the left thalamus and left upper quadrigeminal tuberosity, associated with right insular and left lower frontal involvement. There are numerous microhemorrhages including the lesions previously described in connection with diffuse hemorrhagic axonal lesions and brain stem damage to the right brain stem and tectal lamina. During his one-and-a-half-year treatment in a rehabilitation center, the patient improved his overall cognitive profile. His last neuropsychological assessment carried out at his discharge from the day hospital indicates a normalization of his visual anterograde memory capacities, an improvement of his phasic alert capacities (which remain slightly weak), a preservation of his short-term memory and visual working memory abilities. On the other hand, there is still a fragility in auditory-verbal working memory, and difficulties in respecting the time limit, identifying priorities, and maintaining instructions in order to avoid mistakes. The patient continues to receive physiotherapy twice a week and speech-language therapy twice a week. In the middle of our study, the patient carried out the necessary

examinations to renew his driving license in order to regain his autonomy and professional activity. However, he was refused several times because his reflexes were too slow. Since this event, the patient remains focused on his reaction time, sometimes to the detriment of the success of the exercises. Before his accident, this patient was a full-time baker, he applied for professional reintegration assistance from an UEROS (Unit for Evaluation, Retraining and Socio-professional Orientation) in October 2018.

History of the patient 013

This patient had a road accident in February 2008 on a motorcycle, with an initial Glasgow score of 11, he was 32 years old at the time. Following this accident, he suffered from post-traumatic amnesia for about a month. The patient did not benefit from neuropsychological follow-up. We did not have access to the initial MRI investigation, but a 2010 MRI investigation showed no abnormalities of the corpus callosum, brain stem or hippocampus. On the other hand, he presents petechiae in both frontal lobes, indicating diffuse axonal lesions. These lesions are more numerous in the left frontal white matter, but the largest petechiae is on the right. A second examination in 2012 shows no change except for a slight reduction in petechiae of the left frontal white matter. His last neuropsychological assessment in September 2014 concludes with a weakness in working memory and in the capacity for the theory of mind, especially the attribution of intentionality to others. He also pointed out that his sustained attention span, although efficient, seems very costly from a cognitive point of view. The patient presents a preservation of memory capacities in the very long term. This last assessment did not reveal any cognitive dysexecutive syndrome. From a behavioral point of view, the patient is cooperative in the tasks, nevertheless he appears tired, very demanding, critical and a little arrogant in front of the proposed tests. We noted a tendency to logorrhea with digressions, comments, discrete disinhibition, and a tendency to use stereotyped sentences, which is in line with the conclusions of a previous assessment in 2010 which reported psychiatric disorders requiring specialized follow-up. It is also mentioned that the patient needs to work on acceptance of change. He benefits from a speech therapy follow-up for difficulties of access to the lexical and psychological field once a week. The patient also presents motor sequelae resulting in paresis of the lower limbs and abolition of osteotendinous reflexes. In addition, he suffers from occasional discomfort, with no initiating factor, resulting in tension and paresthesia of the lower limbs, which is relieved by *Rivotril* (taken at the time of the seizures). Before the accident, the patient was a caregiver trainer; after the accident, he had difficulty returning to work, particularly because of attention and

relationship problems. In 2011, he reoriented himself as a medical-social teacher and then as a commercial worker in 2013. In August 2014, he started a part-time executive job in an IT SME, his work consisted mainly of administrative and sales tasks. Since August 2017, the patient is in demand for employment (included in the study in September 2017).

Healthy subjects

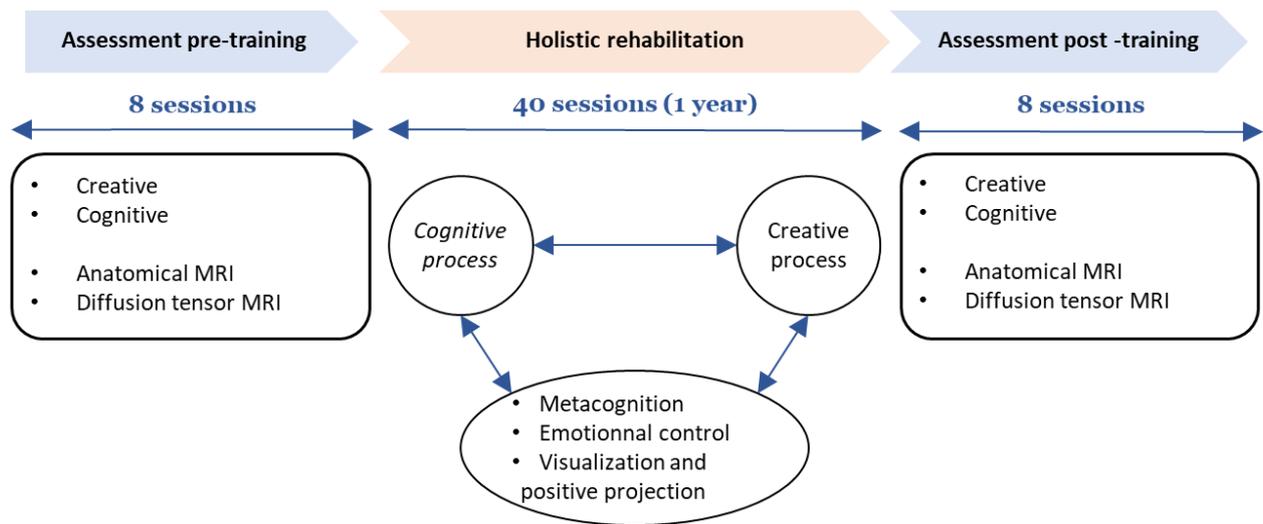
In order to constitute a control group for MRI and TTCT (Torrance Tests of Creative Thinking), we selected 24 healthy subjects, age-matched with our patients (sex ratio: 13F/ 11H; mean age: 37.63 ± 4.05 ; mean number of years of study: 13.88 ± 3.18), among the participants of Deshayes and collaborators (in revision) study.

For standardized neuropsychological tests, we used existing and published standards. For our laboratory-developed tests, problem-solving tests and IRBA computerized versions of the Tower of London, Tower of Hanoi, Simon form and Wisconsin tests, we recruited different groups of age-matched control subjects. The data from these control groups are presented in Appendix 5.

Cognitive assessment

We have chosen to carry out a cognitive assessment as complete as possible in order to better adapt the training to each patient (*Figure 1*). To do this, the assessment includes the tests listed and detailed in Appendices 1 to 3, namely: 1) for memory tests: logical history, word list, number span, RI-48, and PASAT 2) for attentional tests: phasic alert and sustained attention from the TAP Battery, Baddeley's double task, and Memotechnik's double task 3) for executive tests: TMT, Wisconsin, Go/NoGo, Simon's Task, STROOP, Tower of London, Tower of Hanoi, 6-element, WAIS4 battery balances and matrices, Luria problems, fluence, Rey's figure and Minesota. We have also added to these tests those developed by the laboratory, namely the AFVS (sub-tests 2 to 4) and the node test. We used ambiguous images to evaluate the subjects' out of frame at the perceptual level (see Appendix 4). All these tests allow a broad assessment of memory, attention, and executive abilities. We also evaluated patients' creativity using the TTCT (Torrance, 1979, 2008, 2017), a test of divergent thinking and closed problem-solving exercises (see Appendix 6).

Figure 1: Protocol followed by patients



Training content

The holistic training, developed by our team, is based on 40 sessions of one and a half hours, one per week, and is based on the three aspects: cognitive, creative, and emotional. It was developed with the cooperation of the first 5 patients included and not presented in this study (001, 002, 003, 004 et 005).

The key to this kind of rehabilitation is the personalization of the patient's training in order to maximize its impact. Nevertheless, it is essential to establish a "training skeleton" common to all patients. Thus, during each session, each of the 3 aspects targeted by our rehabilitation was systematically trained. The richness and variety of the training exercises used throughout the 40 sessions made it possible to maintain a high level of patient motivation throughout the program.

To work on the cognitive aspect, we relied on exercises from the software Memotechnik developed in the laboratory concerning attention and memory. We also developed training exercises to stimulate the executive functions of the patients, targeting for example their planning. For the creative aspect, open and closed problems as well as tangrams were used. We had at our disposal a library of about 250 closed problems including the 150 problems used in Alescio-Lautier and collaborators study (in submission). We built up a library of about 250 open problems. Convergent thinking was trained with closed problems based mostly on deductive, inductive, and analogical reasoning in semantic, visual, visuospatial modalities. Taking into account the results we obtained in the study of Alescio-Lautier and collaborators (in submission) which showed that complex closed problems could boost the creativity of healthy adult subjects in part by the fluency they required in the invention of new strategies, we trained our patients to generate new strategies and thus train

divergent thinking as well. However, divergent thinking was trained directly with our 250 open-ended problems based on semantic, visual, and visuo-spatial modalities. The tangrams were solved in closed mode (the usual resolution mode proposed by the game). The three patients were trained using convergent and divergent thinking in the same proportions. On the other hand, the level of the exercises was adapted to each patient as well as the modalities.

One of the difficulties was to incorporate metacognition, particularly on creativity but more broadly on brain functioning, with the help of explanations in simple language so that each patient could understand and appropriate the knowledge transmitted. Here too, we have adapted our explanations to the patient's level.

In order to work on emotional control and to ensure that the patient was "present" and able to receive the content of the session, at the beginning of each session, we proposed a time to calm down through cardiac coherence exercises. In addition, we suggested to each patient to identify a behavior or emotion that they themselves considered as a limiting factor in their progress, in order to work on it and break some of these locks. To do this, one of the approaches used was positive projection, i.e. visualizing oneself in a situation that is usually problematic because of the limiting behavior, this time having an appropriate behavior that would allow the situation to be managed properly. This approach also served to immerse the patient in a pleasant universe in order to reduce his stress and negative thoughts. As the sessions progressed, we were able to increment the attentional focusing and defocusing exercises (worked on elsewhere) during these positive projection sessions. In the case of patient 012, since several exchanges did not allow him to identify such behavior or emotion as limiting, we asked him what for him was a limiting factor in his recovery, beyond what we thought we were working on a priori. He identified his motor difficulties, a consequence of his hemiplegia, as a limiting factor. In particular, the patient presented: 1) walking difficulties due to his hemiplegic leg being stiffened, 2) balance problems due to the stiffness of his right leg, 3) a hemiplegic right arm in permanent tension so that he was in a bent position on his chest during both day and night, 4) fine motor difficulties in the fingers of his right hand preventing him from tying shoelaces, for example, and 5) difficulties falling asleep at night and sleeping for more than a few hours. We therefore decided to go outside our area of expertise after 30th session by trying to help the subject improve his motor skills as much as possible. To do so, we proposed a quick exercise of motor mental imagery and an exercise of body scan in the hope of having a

positive impact on the involuntary muscle contractions of his right arm and his difficulty sleeping for more than a few hours each night. We advised him to practice the exercises proposed during the sessions in his daily life.

Statistics

Due to the heterogeneity of our 3 TBI patients, we treated each patient as a case study. In order to highlight the deficits of each one in relation to a norm, Crawford and Garthwaite (2002) proposes a T-test which allows to compare the performance of a subject to a restricted control population by taking into account the size and standard deviation of the latter. The negative sign of the t-value always suggests that the patient's score is lower than that of the normative sample, and vice versa. Patients in chronic stage certainly have cognitive deficits but may also perform much better than the norm on some tests thanks to compensatory phenomena, which is why we consider the p-value as two-tailed. This software has been designed for data following the normal law. Nevertheless, Crawford and his collaborators demonstrate that results with a p-value < 0.02 are significant and very reliable whatever the distribution of the data. We have therefore chosen to set the p-value threshold at 0.02 (Crawford et al., 2006; Crawford and Garthwaite, 2005).

Unlike the Z-score classically used in neuropsychology, this test has the advantage of considering the reference control group as a sample of the population and not as a population in its own right. This avoids overestimating the abnormality score as the Z-score does. The Crawford test is available free of charge on the internet. (<http://homepages.abdn.ac.uk/j.crawford/pages/dept/SingleCaseMethodology.html>).

Imagery

Acquisition

All participants were scanned in a 3T Siemens Prisma equipped with a circular polarized head coil (in the European Center for Research in Medical Imaging; CERIMED, Marseille, France). Images were acquired in the axial plane, parallel to the anterior-posterior commissure axis and covering the entire brain. We acquired T1 images (MPRAGE sequence = Magnetization- Prepared Rapid Gradient-Echo ; TR = 2.4 sec, TE = 2.28 msec., flip angle = 8°, FOV = 256.0 mm, voxels size = 0.8 mm isotropic, and matrix = 256 × 256 mm) and DTI images in both direction antero-posterior and postero-anterior (for each directions the acquisition parameters were the following : TR = 3.002 sec, TE = 73.6 msec., flip angle = 78° FOV = 212 mm, voxels size = 1.8mm isotropic, matrix = 212 x 212 mm, slice thickness = 1.8 mm, diffusion directions = 108, B-value= 0 ; 300 ; 1000 ; 2000, and 81 slices and 109 volumes).

Anatomical analysis

Pre-processing: First, the diffusion images acquired in antero-posterior (AP) were merged with those acquired in postero-anterior (PA). Then, a mask, created from the diffusion images acquired at B0, was used by the FSL *Topup* algorithm to correct the field inhomogeneity. Finally, FSL's *Eddy* algorithm corrected the distortions due to Eddy currents and then the normalization of these corrected diffusion images and T1 images was performed using the DARTEL batch in SPM (matlab v18b, SPM12).

Processing: From the diffusion image normalized with DARTEL we extract the AF, MD, RD and AD maps with the *dtifit* algorithm. We realigned in the same space these four maps with the JHU-ICBM atlas parcellation (Mori et al., 2005, 2008) thanks to the *fnirt* algorithm. Then we applied the parcellation on the four different maps in order to extract the average of AF, MD, RD and AD value for each region of interest (we used the 48 available in the atlas).

Patient 011

Results

Cognition

As can be seen in *Table 2*, patient *011* had no pre-training deficit ($p > 0.02$) despite strong complaints and a well-presented post-concussive syndrome. Following training, we observed in this patient better results than the controls in creativity, in the dimension of originality of the figurative tests ($p=0.018$). On the other hand, in divided attention, the patient had better results than the control group in pre-training ($p=0.0039$) and performed similarly to the controls in post-training ($p=0.18$), thus indicating a slight decrease in performance while still remaining within the norm.

Table 2: Cognitive results of the patient 011

Table showing all cognitive tasks that are significantly different from the controls for the patient 011. Results noted in bold, green with an asterisk are significantly better than the control group. The evolution column informs about the evolution tendency of the subject between his pre- and post-training results.

		011				
Task		Pre-training		Post-training		Evolution
		Result	p-value	Result	p-value	
Attention	Baddeley μ index	130,16	0,0039 *	109,2	0,18	↓
Executive	TTCT Figural Originality	34	0,444	54	0,018 *	↑

Anatomic

In terms of white matter fiber integrity, we do not observe any difference with the control group either pre- or post-training for the anisotropy fraction (AF).

However, we observe differences for the values of MD, RD, and AD ($p < 0.02$) (Figure 2). Patient 011 presents MD deficits in the left inferior cerebellum (pre: t-value= 2.955, p-value= 0.00709 ; post: t-value= 1.970, p-value= 0.06096) and left superior cerebellum (pre: t-value = 2.870, p-value= 0.00866; post: t-value = 2.249, p-value= 0.03437), as well as in left the superior longitudinal fasciculus (pre: t-value= 2.760, p-value= 0.01116; post: t-value= 2.415, p-value= 0.02410) in pre-training. In post-training, the patient has no MD deficit (Figure 2.a).

In terms of RD value, the patient has a significantly higher value than the control group pre- and post-training in the right superior cerebellum (pre: t-value= 2.648, p-value= 0.01437 ; post: t-value= 2.542, p-value= 0.01822), the right (pre: t-value= 2.915, p-value= 0.00779; post: t-value= 2.858, p-value= 0.00889) and left (pre: t-value= 3.248, p-value= 0.00355; post : t-value= 3.127, p-value= 0.00473) superior corona radiata, the right (pre: t-value= 3.323, p-value= 0.00296; post: t-value= 3.323, p-value= 0.00296) and left (pre: t-value= 3.733, p-value = 0.00109; post: t-value= 3.517, p-value= 0.00185) superior longitudinal fasciculus, and the left superior fronto-occipital fasciculus (pre: t-value = 2.738, p-value= 0.01173 ; post: t-value= 2.687, p-value= 0.01317). We also note a higher RD value only in pre-training in the right posterior thalamic radiation (pre: t-value= 2.557, p-value= 0.01763 ; post: t-value= 2.254, p-value= 0.03406) and the right superior fronto-occipital fasciculus (pre: t-value= 2.736, p-value= 0.01176; post: t-value= 2.280, p-value= 0.03218) (Figure 2.b).

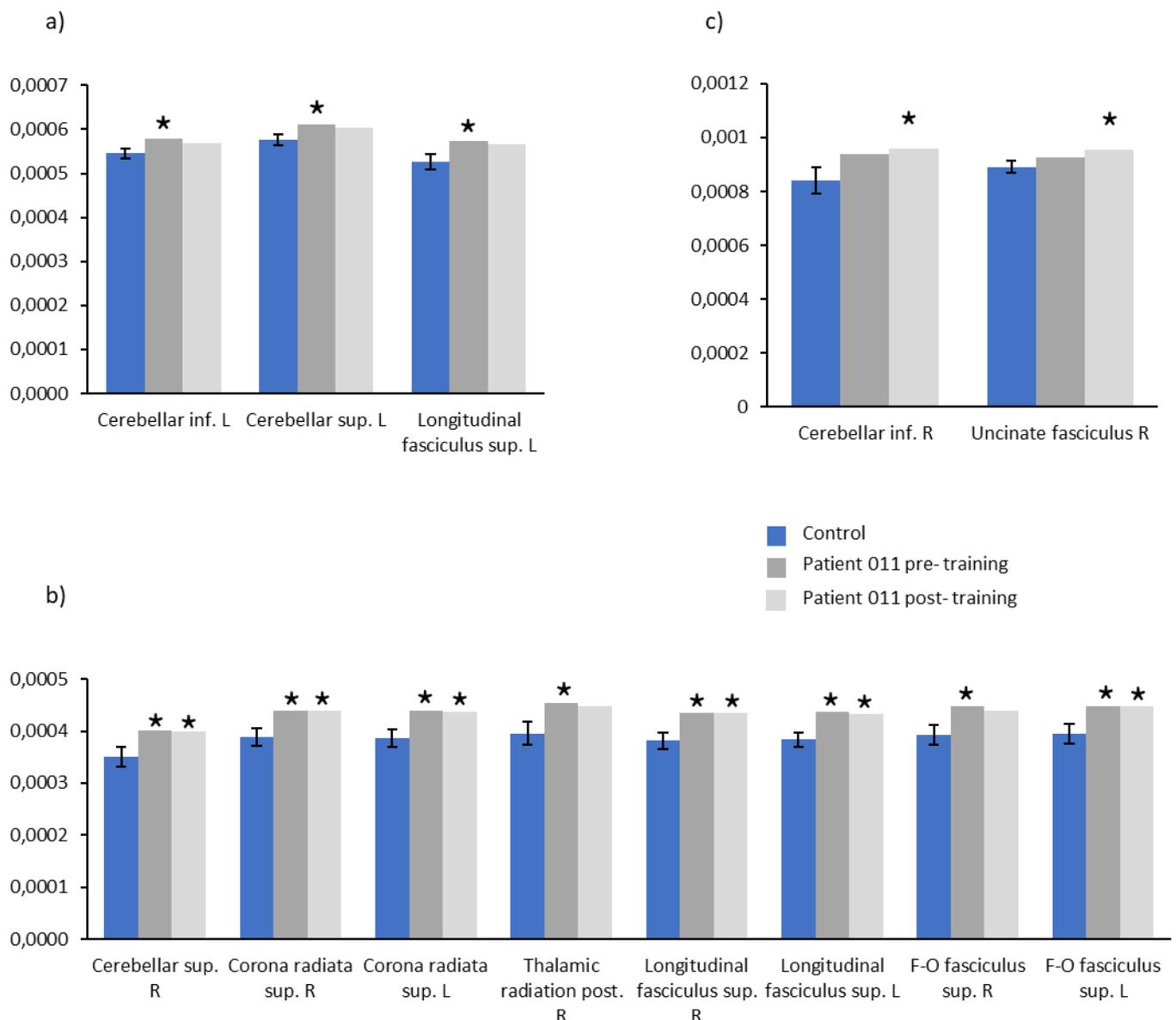
Finally, concerning the AD value, the patient presents no pre-training deficit, but in post-training we can observe a significantly higher value of AD in the right inferior cerebellum (pre: t-value= 1.975, p-value= 0.06042 ;

post: t-value= 2.378, p-value= 0.02611) and the right fasciculus uncinata (pre: t-value= 1.634, p-value= 0,11578 ; post: t-value= 2.827, p-value= 0.00955) (Figure 2.c).

Thus, we note that the AD and MD show differences between pre- and post-training data, whereas the RD variations due to training are more discrete and there is no AF modification.

Figure 2: White matter fiber integrity of the patient 011.

Asterisks indicate deficits compared to the control group in blue. The pre-training values of the patient are in dark gray and the post-training values are in light gray. For this patient, there are no AF deficits. a) MD value: an MD increase indicates fiber damage. b) RD value: an increase indicates a decrease in fiber myelination. c) AD value: an increase indicates axonal damage. F-O fasciculus = Fronto-occipital fasciculus.



Discussion

When she was included in our study, patient 011 was a 23-year-old moderate TBI with post-concussive syndrome and a section of the pituitary stem causing hormonal disturbances. This patient does not present

any cognitive deficit, in pre- or post-training, despite a very present cognitive and psychic complaint that slightly fades during rehabilitation. These symptoms constitute, for this patient, a real invisible handicap in her everyday life. The tests proposed in neuropsychology, as well as those we developed, were not sensitive enough to highlight her everyday difficulties. More complex tests should therefore be developed, which would be designed to reproduce a more ecological cognitive context, and which would better represent daily tasks.

Because of the low measurable evolution at the cognitive level, it would have been beneficial for the patient to objectively visualize her progress during rehabilitation to reinforce the motivation she has shown. Despite this lack of results, from a behavioral point of view we were able to observe obvious improvements. Indeed, the violent headaches she suffers from, accompanied by neurovegetative comital crises, forced her to postpone one session out of two at the beginning of the treatment, which was no longer the case at the end of training. There was therefore a reduction in her PCS, this progressive evolution went unnoticed by the patient, leaving her feeling stagnant.

Metacognition sessions proved to be very effective in this patient. In addition to being very receptive to new things, she has been practicing meditation regularly for several years, which has facilitated stress management, positive projection, and attention management sessions. Given the involvement of attention, emotions and mental imagery in creativity (Ansburg and Hill, 2003; De Dreu et al., 2008; Hao et al., 2015) and more specifically, mental imagery in divergent figurative thinking (LeBoutillier and Marks, 2003), we believe that these practices are responsible for the improved performance in figurative divergent thinking of this patient.

These behavioral and cognitive changes are underpinned by anatomical modifications, including an improvement in the integrity of the white matter fibers in the right and left superior fronto-occipital fasciculus. These two bundles constitute the ventral language pathway, they are involved in visual feedback processes (Forkel et al., 2014) and play a role in semantic processes (Almairac et al., 2015; Surbeck et al., 2020). Moreover, the longitudinal fasciculus is involved in spatial working memory (Lai and Wu, 2013) and the fronto-occipital fasciculus is thought to be an element of the visual mental imagery network (Herbet et al., 2017) which, we showed in our paper Deshayes and collaborators (in revision), is involved in creative processes through working memory. These results are consistent with the work carried out during our training on positive projection in mental imagery. Furthermore, the increase in AD highlighted in the fasciculus uncinata,

connecting the frontal cortex and the amygdala, can be interpreted as a better anatomical support allowing an increase in emotional control (Lai and Wu, 2013). In addition, the abnormal MD measurements observed in the superior cerebellum, involved in motor control and prediction of co-occurrence of events, are related to the patient's motor complaints. On the other hand, the lower cerebellum is involved in the cerebellar affective cognitive syndrome (impairment of executive functions, visuo-spatial processes and affect regulation) (Schmahmann, 2019) and has also been shown to be involved in thought automation processes and idea generation, particularly during the illumination stage in creativity (Saggar et al., 2017). Thus, normalization of MD values in this region would underpin better cognitive efficiency, which would lead to improved creativity in this patient.

All these results show the effectiveness of emotional control and positive projection training on the reduction of PCS in patient 011. It is important to note that none of the previous clinical imaging investigations revealed any brain abnormalities. We believe that in order to be able to identify an anatomical substrate related to the difficulties reported by patients with no cognitive impairment, but only subjective complaints, it would be more appropriate to propose a fine white matter analysis rather than a classical anatomical MRI. In addition, it is interesting to note here that AF, which is the most widely used measure in diffusion to account for white matter integrity, is not sufficient in the case of patient 011 to reveal an anatomical impairment. We believe that the fine structural damage that can individually vary MD, AD and RD values is not large enough to vary AF, which is a composite value.

To conclude with patient 011, we can say that the holistic rehabilitation, which was proposed to her in the very long term of her trauma (23 years), had a beneficial effect on her post-concussive syndrome underpinned by fine anatomical modifications of fiber bundles important for cognition.

Patient 012

Results

Cognitive

The results for patient 012 are presented in *Table 3*. Patient 012 had many pre-training deficits in memory, attention and executive functioning but exceeded the norm in Figural Originality TTCT ($p < 0.02$). As a result of our holistic training, the patient performed significantly better on several executive tests: the TMT, STROOP,

Hanoi Towers and the 6-Element Task. However, he remained deficient on the AFVS level 4 and the Minesota test. Its attentional performance was also significantly improved despite difficulties still present in the last five minutes of the sustained attention test. Memory disorders persisted at the end of rehabilitation, although a favorable evolution was observed for some of the tests (*Table 3*).

The training in motor mental imagery carried out in order to work on the element identified as a factor limiting its progression, namely its motor disorders, proved to be particularly effective. We were not able to quantify them with tests, but we were able to observe clear improvements in : 1) walking, which became more fluid; 2) balance, he could remain stable for several seconds by closing his eyes even after only a few sessions thanks to a diminishing stiffness of his right leg; 3) he was able to regain better control of his right arm, which he managed to maintain in an almost normal position at the end of our training; 4) he was capable of many precise movements that were impossible before our sessions, namely tying his shoelaces (he was very proud of this and even arrived one day at a session by showing us his new purchase : a pair of shoes with laces), or slicing vegetables; 5) the right arm relaxation when he was sleeping allow to improve his quality of sleep.

Anatomic

Because patient 012 show a lot of abnormalities in AF, MD, RD, and AD, we choose to present and discuss only results with pre- and post-training difference ($p\text{-value} < 0.02$) (*Figure 3*). The AF value seems to be more relevant for this patient to show both deficits and evolution pre-/ post- training (*Figure 3.a*). The AD value, for this patient, does not reveal any deficits maintain in post-training, it only highlights pre-/ post- training evolution (*Figure 3.d*). The MD and RD value, which show an impairment of the fiber structure, show less deficits than the AF and highlight some difference pre-/ post- training (*Figure 3.b and 3.c*). So, for this patient AF seems to be the more relevant values to identify physiological sequel and effect of the training. Moreover it seems that the AD value only shows a positive evolution of the white matter structure after rehabilitation, which suggests a greater sensitivity of these measurement of the cerebral microstructure to the effects of training.

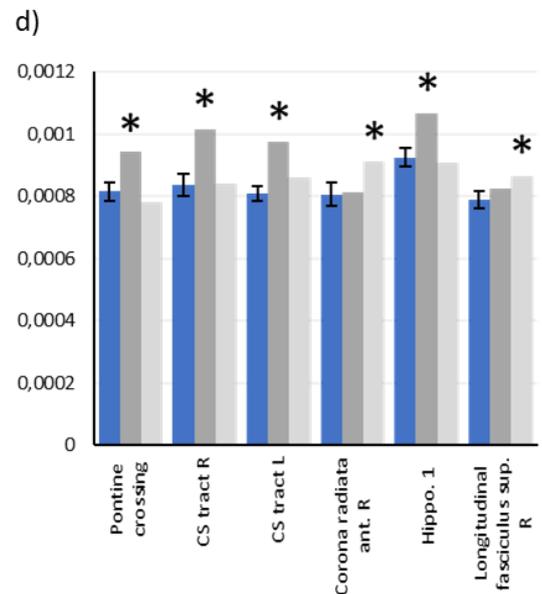
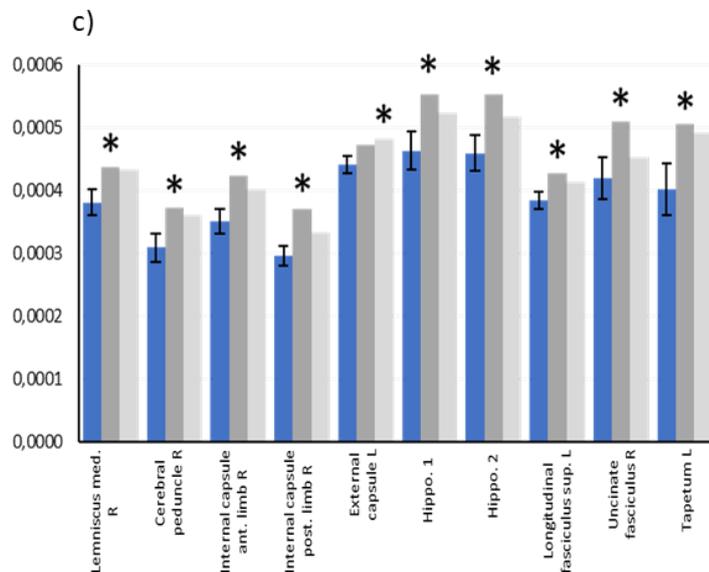
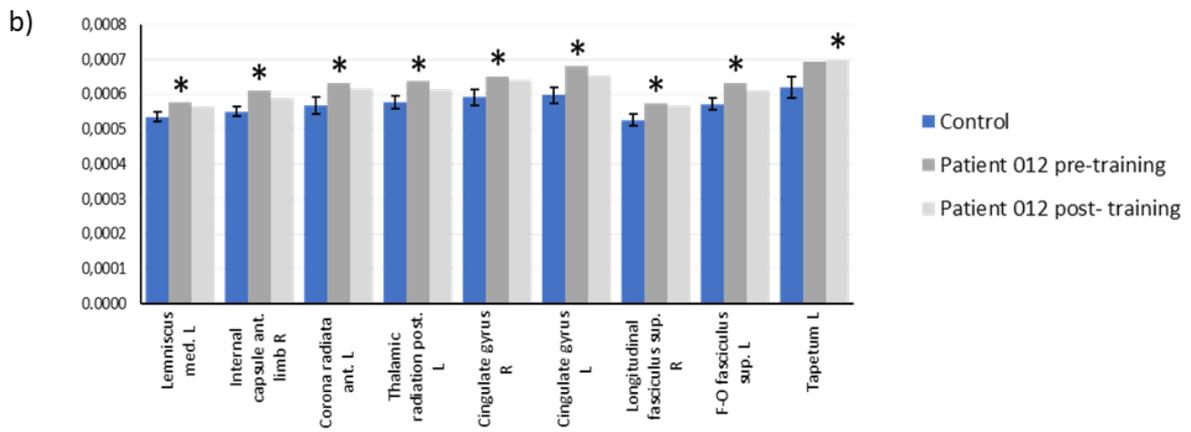
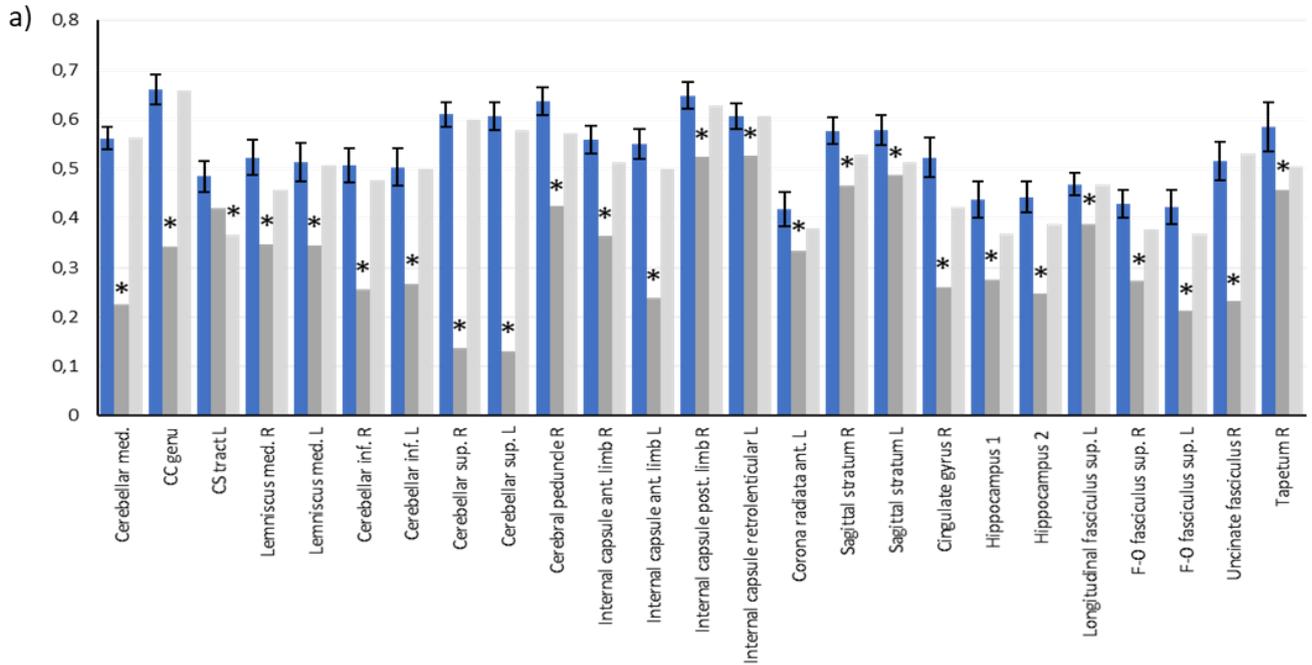
Table 3: Cognitive results of patient 012

Table showing all cognitive tests significantly different from controls for patient 012. Results noted in bold, red with an asterisk are significantly deficient compared to the norm or control group, and in green that they are significantly better. The evolution column informs about the tendency of the subject's evolution between his pre- and post-training results. SN = Standard Note (mean: 10 +/- 3; pathological < 5) from Neuropsychological batteries (Greffex, BEM3, WAIS4). RT = Response Time, CR = Correct Response.

012						
Task	Pre-training		Post-training		Evolution	
	Result	p-value	Result	p-value		
Memory	Word list Learning	8	SN	3 *	SN	↓
	Word list Total immediate recall	3 *	SN	6	SN	↑
	Word list Interference effect	1 *	SN	1 *	SN	=
	Word list Deferred recall	4 *	SN	4 *	SN	=
	Word list Recognition	4 *	SN	4 *	SN	=
	Logical memory recall % Retention	6	SN	4 *	SN	↓
	Simple node %CR Described	40	0,011 *	100	0,313	↑
	AFVS level 3	0.0241	0,002 *	0.01689	0,245	↑
	PASAT %CR	71.67	<0.001 *	85	0,11	↑
Attention	TAP Sustained attention %CR 5-10 min	15	0,003 *	54	0,176	↑
	TAP Sustained attention %CR 10-15 min	22.2	0,002 *	44.44	0,036	↑
	TAP Sustained attention %CR total	26.98	0,002 *	56.25	0,118	↑
	TAP Sustained attention RT 10-15min	948	0,016 *	940	0,018 *	=
Executive	TMT B %CR	79.17	<0.001 *	100	0,765	↑
	TMT B RT	136	0,005 *	125	0,017 *	=
	Wisconsin card categories number	7	0,004 *	7	0,004 *	=
	STROOP Denomination Total RT	102	<0.001 *	92	0,003 *	=
	STROOP reading Total RT	61	0,013 *	60	0,029	↑
	STROOP Interference Total RT	180	0,013 *	153	0,094	↑
	Hanoi tower Total RT	882	0,018 *	685	0,124	↑
	6 elements Execution error	5	0,001 *	0	0,675	↑
	6 elements Score points	412	<0.001 *	994	0,848	↑
	AFVS level 4	0.034	0,002 *	0.03	0,012 *	=
	Minesota	16	0,004 *	7.6	0,001 *	=
	TTCT Figurative Originality	51	p=0,01 *	31	p=0,39	↓

Figure 3: White matter fiber integrity of patient 012.

Asterisks indicate deficits compared to the control group in blue. The patient's pre-training values are in dark gray and the post-training values are in light gray. a) AF value: a decrease indicates fiber damage to the white matter. b) MD value: an increase indicates fiber damage. c) RD value: an increase indicates a decrease in fiber myelination. d) AD value: an increase indicates axonal damage.



Discussion

Patient *012*, a severe TBI at 2 years after his trauma, shows an improvement of a large part of his cognitive functions (memory, attention, and executive functions). We also observed significant vigilance problems in this patient. Indeed, he was repeatedly drowsy during the pre-training assessment sessions and training sessions. Interestingly, this drowsiness became rare during the study without being totally corrected. It should be noted that this fatigability, among other things visible on the results of the last five minutes of the sustained attention test, associated with persistent memory disorders, is a deleterious element for the proper functioning of executive functions. We therefore believe that it limited the patient's overall cognitive improvement. These executive difficulties are particularly visible at level 4 of the AFVS, where the training memory is strongly solicited. The patient's drowsiness, associated with an underlying visual-spatial disorder, also impacted the proper performance of the Minesota in pre-training. In addition, in post-training, the performance of patient *012* on this test remained deficient, which could be interpreted as a lack of effect of our training on the cognitive functions related to this test. However, there is another factor involved in explaining the post-training performance on the Minesota and Patient *012* creativity tests. This is a change in the strategy of patient *012* with respect to the proposed tests. Indeed, during his treatment, he made his response time the main element to be improved during the tests, sometimes to the detriment of the correct response, despite our recommendations. Thus, the Minesota and creativity tests of the last assessment were completed by the subject before the time allowed for each test, thus impacting their success.

Concerning the clear benefits obtained in the superior and inferior limb motor skills, as well as in the fine motor skills and balance, they were possible thanks to two major elements, namely a highly developed motor mental imagery capacity in patient *012*, and a very high motivation to perform the exercises even between sessions. However, it should also be noted that this mental imagery training carried out before the realization of each movement induced in the early stages, a notable cognitive fatigue reported by the patient himself. Indeed, in order to be able to correctly perform all the movements he wanted to perform; the patient had to make a permanent cognitive effort. For example, for an automated function such as walking, patient *012* had to think at every moment on the position of his right leg in order to implement a fluid movement. This increase in the patient's mental workload potentially had a negative impact on other aspects of our training.

However, this effect was only transitory because, thanks to his high motivation and the frequency of the exercises, he was able to restore automated motor control over certain movements such as walking.

It seems important to us to underline this patient's positivism in front of the hardships he may encounter in his life, a particularity that we believe participates in his progression since his trauma. This behavior is common in patients whose physical, cognitive or psychological functions have been brutally impaired. They then show a willingness to return to their initial state of health by seeking to regain their lost functions. Here, patient *012* focuses only on his progression and not on the abilities he has lost, probably due to his retrograde amnesia. This limits the sense of frustration observed in many patients to giving way to pride in what they have accomplished since the accident.

Beyond his participation in our clinical study, it should be noted that patient *012* continued his physiotherapy and speech-language therapy twice a week in parallel with our rehabilitation; this most likely contributed to his improvements and made his rehabilitation more holistic than that of the 2 other patients in the study.

Our results in diffusion tensor imaging reinforce the cognitive results of this patient. We observe an overall improvement in the white matter integrity of several bundles, including the tapetum, corpus callosum, sagittal stratum, fronto-occipital fasciculus, and longitudinal fasciculus. Thanks to the work of Chen and collaborators (2016) on patients with ADHD, a link was made between these structures and attentional processes. Indeed, an impairment of these different fibers induces inattention and distractibility. The tapetum is involved in the auditory information transfer processes, it is a bundle of fibers that crosses the corpus callosum and is essential for inter-hemispheric communication. The authors showed that a decrease in AF in the splenium of the corpus callosum was correlated with inattention and distractibility. In addition, the sagittal stratum is formed by the fasciculus fronto-occipital and fasciculus longitudinal fasciculi, two fasciculi respectively involved in attention shifting and visual recognition (Chen et al., 2016). Thus, an improvement in the integrity of these fibers would underpin the improvement of this patient's attention span, but also his behavioral improvement with a reduction in his hypovigilance. In addition, we also observe a normalization of the hippocampus and thalamic radiation which are involved in memory, particularly short-term visual memory (Menegaux et al., 2017). The tapetum, fasciculus fronto-occipital and fasciculus longitudinal are involved in the

integration of visual and auditory information (Chen et al., 2016) which are processes on which memory is based (Emmorey et al., 2017; Malaia and Wilbur, 2019). Consequently, these findings lead us to believe that the improvement in the integrity of these fibers underlies the memory improvements observed in this patient in post-training.

In this patient *012*, we put a lot of emphasis on motor mental imagery and emotional control, although it seems that emotional control did not work from a behavioral point of view, we are seeing anatomical changes that would be harbingers of future changes. Indeed, following training, we observe an improvement in the integrity of the fibers of the fasciculus uncinata, the longitudinal fasciculus and the inferior cerebellum. These three structures are involved in emotional control (Lai and Wu, 2013). Thus, this result tells us that there would be a change in brain structure before the behavioral change. Moreover, the motor mental imagery associated with physiotherapy has strongly shown results because we observe an improvement of the integrity of the white matter within the motor tract, namely: the anterior corona radiata, the internal retrolenticular and internal capsule, the superior cerebellum, the cortico-spinal tract (Jang, 2009; Schmahmann, 2019), and notably with an improvement in the integrity of the medial lemniscus, a region which is linked to hemiplegia severity (Jung et al., 2012).

The overall results obtained in patient *012* show a clear benefit of our rehabilitation on several trained functions, both cognitive and motor, with a wide range of anatomical clues indicating that these benefits are based on many modifications of the microstructure of the cerebral white matter in relation to its functions. Some parts of the training were not effective enough to induce cognitive and behavioral changes but were successful at the brain level. This patient should therefore continue to be managed by emphasizing those parts that took longer to develop, namely emotional control and metacognition.

Patient 013

Results

Cognitive

Patient *013*'s cognitive scores reflect memory impairment at the auditory span, word list and complex node, and mild executive deficit at the STROOP and Tower of London Level 3 (*Table 4*). After our rehabilitation, the patient no longer shows any deficit and his performance on several tests outperforms that of the control

group. In addition, around the thirtieth session the patient started a professional training at a UEROS (Unit for Evaluation, Re-training and Socio-Professional Orientation).

Table 4: Cognitive results of patient 013

Table presenting all the cognitive tests significantly different from the controls for the patient 013. The results noted in bold, red and with an asterisk are significantly deficient compared to the norm or the control group and those in green are significantly better than the control group. The evolution column informs about the tendency of the subject's evolution between his pre- and post-training results. SN = Standard Note (mean: 10 +/- 3, pathological < 5) from Neuropsychological batteries (Greffex, BEM3, WAIS4). RT = Response Time, CR = Correct Response, IES = RT/%CR.

		013				
Task		Pre- training		Post- training		Evolution
		Result	p-value	Result	p-value	
Memory	Auditory span	3	0,006 *	6	0,552	↑
	Word list Interference	1 *	NS	5	NS	↑
	Complex node %CR describe	41.67	<0.001 *	32.45	0,398	↑
Attention	TAP phasic alert RT No Warning	205	0,052	188.5	0,014*	↑
Executive	STROOP Reading Total RT	56	0,016 *	52	0,073	↑
	TAP Go/NoGo RT	390	0,359	232	0,001*	↑
	London tower IES level 3	292.52	0,002 *	72.39	0,464	↑
	TTCT Figural Elaboration	70	0,675	148	0,018*	↑
	TTCT Figural Originality	48	0,055	64	0,002*	↑
	TTCT Figural Total	169	0,259	250	0,009*	↑

Anatomic

Regarding the integrity of the white matter fibers, the results presented in *Figure 4.a* (p-value< 0.02) show in patient 013 a significant low value of AF in pre- and post-training in the genu of the corpus callosum (pre: t-value= -4.292, p-value= 0.00027; post: t-value= -3.949, p-value= 0.00064) and fornix (pre: t-value= -3.563, p-value= 0.00165; post: t-value= -3.627, p-value= 0.00141).

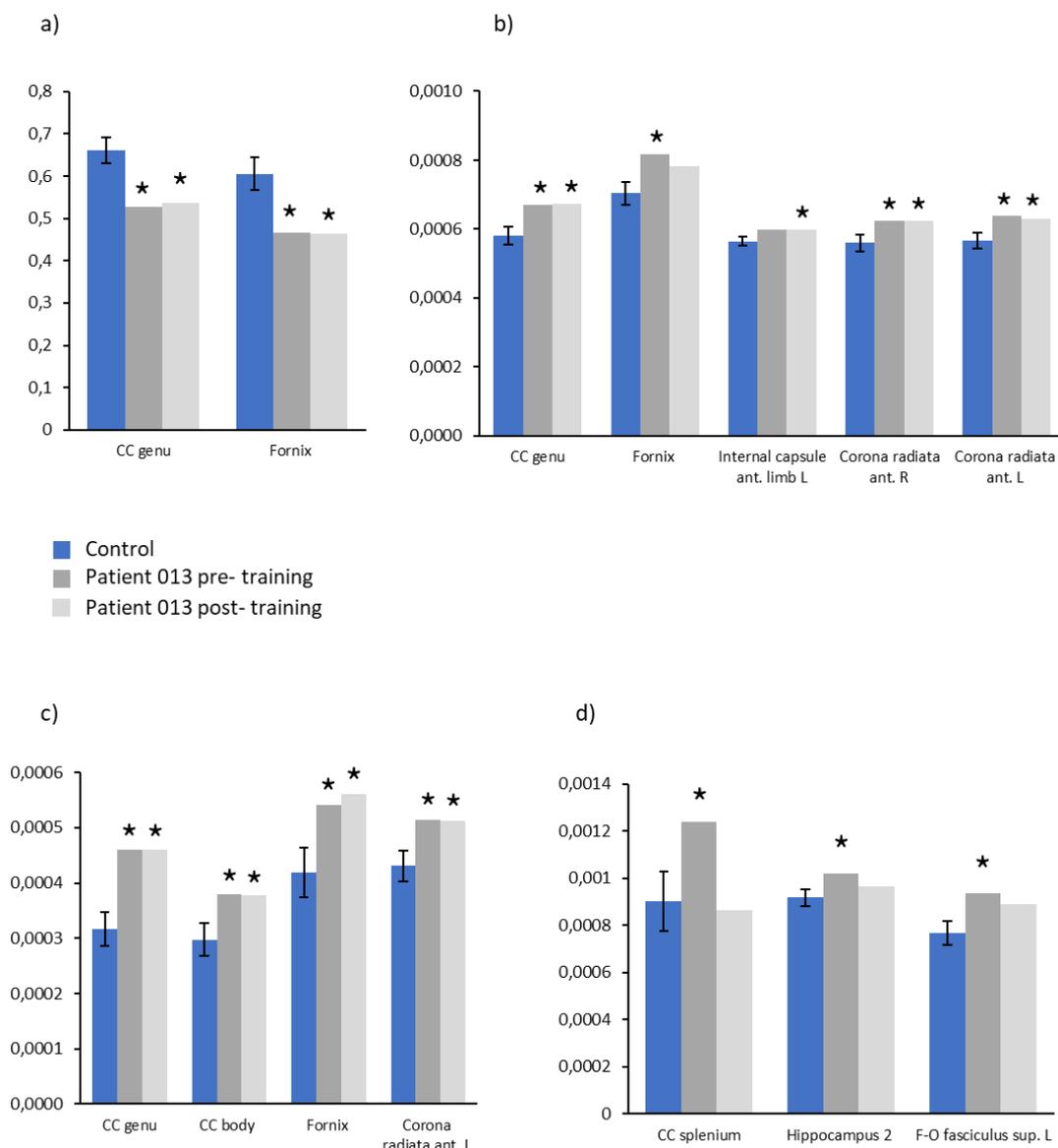
For MD, we also observe high values in pre- and post-training in the genu of the corpus callosum (pre: t-value= 3.263, p-value= 0.00342; post: t-value= 3.338, p-value= 0.00286), the left (pre: t-value= 2.877, p-value= 0.00851 ; post: t-value= 2.593, p-value= 0.01625) and right corona radiata (pre: t-value= 2.542, p-value= 0.01822 ; post: t-value= 2.542, p-value= 0.01822), at the anterior limb of the internal capsule the pre-value is close to being deficient as in post-training (pre: t-value=2.447, p-value=0.02245 ; post: t-value=2.521, p-value=0.01907), and a high value only in pre-training in the fornix (pre: t-value=3.301, p-value= 0.00312 ; post: t-value= 2.308, p-value= 0.03034) (*Figure 4.b*).

For the RD, we observe high values in pre- and post-training in the genu of the corpus callosum (pre: t-value= 4.593, p-value= 0.00013 ; post: t-value= 4.593, p-value= 0.00013), the body of the corpus callosum (pre: t-value= 2.665 , p-value= 0.01383 ; post: t-value= 2.567, p-value= 0.01722), the fornix (pre: t-value=2.648, p-value= 0.01436 ; post: t-value= 3.061, p-value= 0.00554) and the left anterior corona radiata (pre: t-value= 2.961 , p-value= 0.00701 ; post: t-value= 2.925, p-value= 0.00761) (*Figure 4.c*).

Finally, for AD, the patient presents high values only in pre-training in the splenium of the corpus callosum (pre: t-value= 2.634 , p-value= 0.01484 ; post: t-value= -0.298, p-value= 0.76849), the hippocampus (pre: t-value= 2.731 , p-value= 0.01192 ; post: t-value= 1.283, p-value= 0.21214) and in the left superior fronto-orbital fasciculus (pre: t-value= 3.194 , p-value= 0.00403 ; post: t-value= 2.367, p-value= 0.02673) (*Figure 4.d*).

Figure 4: White matter fiber integrity of patient 013.

Asterisks indicate deficits compared to the control group in blue. The pre-training values of the patient are in dark gray and the post-training values are in light gray. a) AF measurement: a decrease indicates damage to the fibers of the white matter. b) MD measurement: an increase indicates damage to the fibers. c) RD measurement: an increase indicates a decrease in the myelination of the fibers. d) AD measurement: an increase indicates axonal damage.



Discussion

Patient *013* is a moderate TBI at 9 years post-traumatic delay, with a global cognitive improvement, including non-deficient pre-training functions such as phasic alertness, inhibition and creativity for which the patient performs better than the control group. Attention and inhibition are defined in the literature as underpinning creativity (Ansburg and Hill, 2003; Martindale, 2007; Mendelsohn, 1976). It is therefore reasonable to assume that our training focused on creative processes has improved divergent thinking by increasing attentional performance and inhibitory control, thus enabling optimal cognitive improvement. Moreover, a cognitive slowness measured by the Tower of London and the reading time at the STROOP during his pre-training assessment, associated with difficulties in accessing the lexical field evoked in his medical history, is no longer observed in post-training.

Furthermore, as highlighted in his medical history, this patient presented inappropriate behaviors, notably a certain disinhibition and problems with social interactions that we also noted from the first session. Such behavioral disorders represent a priori limits to treatment but can constitute levers when they are correctly identified. Indeed, we have observed a reduction in this propensity over the course of the sessions, and we believe that this is due to the implementation of unconventional exercises. Our holistic training differs from the conventional rehabilitations that the patient has already experienced, in particular through the addition of exercises in creativity, metacognition, positive projection and emotional control. Interestingly, the novelty was an important factor in boosting motivation. Likewise, the patient expressed several times during the training, the wish to receive regular feedback from us to objectify his progress and thus stimulate his motivation to continue training. However, as the literature on creativity clearly describes, motivation is an essential factor in the potentiation of creativity (Amabile, 1983, 2013; Amabile et al., 1994). In addition, we observed that the work done on metacognition enabled patient *013* to become aware of the cognitive and behavioural mechanisms at the origin of his disorders, while the positive projection and management of emotions encouraged him to behave more positively and appropriately as the training progressed.

From an anatomical point of view, at the end of his therapy, this patient presents persistent abnormalities in the corpus callosum, fornix and anterior corona radiata, highlighted by both AF, MD and RD measurements. On the other hand, we observe a normalization of AD values that accounts for the density of

the tract (Surbeck et al., 2020) in the corpus callosum, hippocampus and superior fronto-occipital fasciculus. There is also a normalization of MD is observed in the fornix. First, it is necessary to note here the inconsistency between the conclusions of his previous anatomical assessments, which reported a preservation of the corpus callosum and the hippocampus, and our present results. Again, for this patient, this inconsistency underlines the lack of sensitivity of the examinations performed in the clinic, which are not adapted to highlight fine abnormalities at the origin of chronic deficits. At the anatomical level we also observe a normalization of the white matter microstructure in the fornix and hippocampus, structures involved in episodic memory (Foster et al., 2019). Given the known links in the literature between episodic memory and creativity (Benedek et al., 2020; Madore et al., 2015, 2016), we deduce that these anatomical improvements would be at the origin of the potentiation of creative thinking in this patient. To conclude on the results of patient *O13*, we can say that our rehabilitation was beneficial to him, leading to a cognitive recovery but also a normalization of certain behaviors conducive to his socio-professional reintegration. Moreover, the anatomical results are interesting, first because they are in agreement with the cognitive data but also because they show that even in a patient who is more than 9 years away from his trauma, the brain is able to modify its microstructure in response to a holistic stimulation.

General Discussion

All of the results obtained in this study allowed us to identify several points for discussion, beyond the analysis of each of the three cases presented.

We have been able to observe that when rehabilitation is considered, the patient's motivation is an essential prerequisite (Maclean, 2000). Although it is obvious that the patient should be encouraged and motivated, care should be taken not to congratulate the patient too much during the sessions as this may, depending on his character, give him the impression that he no longer needs to improve. Beyond the practitioner who has a great interest in following the patient's evolution, the patient himself needs to objectify his progress. It would be quite conceivable to propose to patients to follow their motivational, emotional and well-being state, as well as any change in their family or professional environment that could disturb the proper progress of the rehabilitation through an application that could also inform the practitioner in real time.

Thanks to intermediate assessments such as monthly check-ups, the patient's evolution is much more than a subjective feeling and allows him to be a protagonist in its own right in his care. Otherwise, the minimum would be to evaluate the changes in patients' daily life at least once a month, through a questionnaire. Moreover, if the patient does not come on his own and a relative encourages him to follow the training, he does not personally invest in the rehabilitation. It is certainly this lack of motivation which, in the TBI population, is at the origin of the high rate of loss during rehabilitation (Jourdan et al., 2013; Vallat-Azouvi, 2019). We were faced with this as 4 of the 13 patients we recruited abandoned the study. Each of the three patients in this pilot study were interested and motivated by a specific aspect of rehabilitation, namely emotional control for patient 011, motor mental imagery for patient 012 and problem solving for patient 013. It is therefore important to have as holistic an approach as possible so that each patient finds a key element that will stimulate and maintain motivation throughout the rehabilitation.

Motivation is therefore an essential element in patient rehabilitation, but not only, it is also a key element in creative processes (Amabile, 1983, 2013; Amabile et al., 1994). However, as a reminder, we have integrated elements of creativity in this training to promote its improvement. Creativity allows individuals to cope and be more resilient, an essential skill in the context of a pathology such as TBI. We have noticed that following our training the effects on creativity have been varied across our three patients. We believe that this result depends on the effectiveness of the different aspects we implemented during this rehabilitation, namely cognition, problem solving, emotional control and metacognition. For patient 013, in whom all of these aspects were successful, we observe an overall improvement in creativity, whereas for patients 011 and 012, for whom respectively the cognitive aspect and the metacognition aspect were unsuccessful, the results in creativity are very inconclusive. Thus, in the case of a cerebral pathology such as TBI, in order to observe an overall improvement in creativity, it is first necessary to induce the widest possible multi-domain improvement.

Moreover, both cognitively and anatomically, we perceived different reactions depending on the duration of the post-traumatic delay. Among other things, we found that the hindsight patients show towards their sequelae is highly variable and that the approach of the examiners must be individually adjusted accordingly. Of course, character plays a role in the ability of each patient to step back, but when the patient is still close to their TBI and their deficits have barely stabilized, the subject is not yet fully aware of the new limits they have to face. From this point of view, patient 012, seems still in a phase of habituation to his disorders and

does not yet seem ready to accept an approach targeting metacognition. Similarly, emotional control remains a complicated exercise for him. We hypothesize that the fatigability that the patient is confronted with could come from the constant management of his disorders, increasing his mental load in everyday life. This aspect was further increased by the mental imagery training that he regularly practiced even outside our sessions, thus contributing to his high mental load in daily life. This is why we believe that metacognition and especially emotional control did not provide cognitive and behavioral benefits for patient 012. These results lead us to suppose that, for patients with moderate to severe TBI and at the beginning of the chronic stage, a focus on cognitive functions, both deficient and non-deficient, in order to promote the emergence of compensatory behaviors, is more favorable. It is not our intention here to make a case study a generalization. Of course, this does not mean that any metacognition or emotional control training would be useless under these conditions, simply, for the reasons we have given, there is a certain probability that it will not succeed.

For longer-term TBI patients, after a long and busy care pathway, long years of accommodation to their deficits and confrontation with painful administrative and sometimes legal procedures, the majority of patients have a good understanding of their disorders when they do not suffer from anosognosia (Flashman and McAllister, 2002). The goal of rehabilitation is then to optimize the compensations already established to minimize the impact of the symptoms on the quality of daily life with the hope, for the patient, to return to a life that he or she describes as "normal". It is mainly in this context that metacognition and emotional control operates efficiently. We believe that the more the patient knows himself, understands and manages his emotions, the lower the cognitive cost, making him more available to learn new information, thus promoting introspection. It is a positive circle that is put in place. Although no cognitive improvement is visible through the tests achieved in patient 011, the work carried out in rehabilitation is successful mainly in terms of the well-being felt, underpinned by better management of her post-concussive syndrome, allowing a return to a more regular biological rhythm adapted to the recovery of social activities. However, in this patient, we observe an improvement in creativity only on the dimension of originality. This patient presents very limited cognitive improvement following our re-education and has therefore not acquired additional cognitive resources that would have allowed her to further improve her creativity. Given that her trauma occurred when she was very young, we assume that her cognitive reserve did not have time to build up properly (Christensen et al., 2008), not allowing her to have the resources necessary for greater cognitive improvement.

This dichotomy between patients with short and very long post-traumatic delays in the chronic stage leads us to think that there would be a "critical period" in the chronic stage during which the patient's cognitive reserve and self-knowledge is sufficient to allow an optimal potentializing of creative capacities. In this perspective, training should be carried out punctuated by steps, which prior to this "critical period" would be centered on a progressive recruitment of cognitive processes (increasing difficulty), then creative processes and finally gradually move towards an approach more centered on metacognition and emotional control as we get closer to the "critical period". Patient *013* seems to account for this critical period as we observe an overall improvement in creativity underpinned by an improvement in overall cognitive, behavioral, and white matter fiber integrity. These improvements have allowed the patient to feel well enough to restart his active life.

As we have seen with patient *011*, PCS is not a syndrome to be neglected, because like the dysexecutive syndrome, it induces difficulties in socio-professional reintegration (Jourdan et al., 2016; Teasdale and Engberg, 2005a, 2005b). Although the neuropsychological tests failed to reveal the difficulties and complaints expressed by the patient, we were able to show white matter impairment with fine DTI measurements of AD, MD and RD. Compared to other patients, AF does not seem to be relevant at all in PCS. However, as in patient *013*, we observe that MD and AD can report post-training change without any change in RD. Given that AD and MD report axonal damage and that RD is related to fiber myelination, we can assume that in chronic stage patients with long post-traumatic delay, it would be axonal regrowth (Cao et al., 2016; Surbeck et al., 2020) that would underlie patients' cognitive and behavioral changes. These results are particularly remarkable because it is generally recognized that in a mature brain, brain plasticity is much more limited than during the developmental period (Hübener and Bonhoeffer, 2014).

In contrast, for a patient who is closer to his trauma, such as patient *012* who has a large number of deficient areas in terms of AF, MD, RD and AD in pre-training, the improvements observed are mainly underpinned by the values of AF and AD. However, it should be noted that the improvement in MD and RD values only concerns very few regions and seems less sensitive to changes. Thus, for patients in the early chronic phase, AF is the main area of significant change. Furthermore, the fact that we find significant changes in AD in both short- and long-term post-traumatic patients is in agreement with the literature, which categorizes this measure as a precursor to more significant changes and is therefore the one most easily

impacted (Surbeck et al., 2020), whereas AF seems more specific and intrinsically related to post-traumatic duration, as we observe a continuum between our three patients.

CONCLUSION

In conclusion, this study evaluating the effect of a holistic rehabilitation focused on creativity in patients in chronic stage, allowed us to highlight that according to the post-traumatic duration, the impact of the rehabilitation differed, both in cognitive and cerebral terms. We pointed out the existence of a possible critical period corresponding on the one hand to a certain level of introspection of the patient towards his state and on the other hand to a stabilization of his cognitive reserve at a sufficient level. This period is the most appropriate to propose a holistic rehabilitation. Indeed, this period is generally accompanied by a greater motivation of the patient to recover his state before his trauma, which is necessary for a successful long-term treatment. Furthermore, our results show that in order to evaluate the impact of rehabilitation on the brain structure of very long-term post-traumatic patients, it is necessary to rely on finer measures of axonal integrity than AF, which is classically used to study this aspect. Indeed, AD has proven to be the most sensitive measure in our two patients at a great distance from their trauma and is also a precursor of future changes.

These results, although preliminary, indicate that our holistic rehabilitation is perfectly adaptable to the broad spectrum of disorders in the TBI population and could also be extended to other pathologies. We also believe that at least 2 sessions per week would be judicious with the integration of creative exercises that would stimulate and maintain a high level of motivation in patients. In the near future, the existing program will be reinforced by the addition of psycho-behavioral therapy and brief therapy to act on psycho-behavioral blockers for whom emotion management alone is not enough.

References

- Almairac, F., Herbet, G., Moritz-Gasser, S., de Champfleury, N. M., and Duffau, H. (2015). The left inferior fronto-occipital fasciculus subserves language semantics: A multilevel lesion study. *Brain Structure and Function*, 220(4), 1983-1995. <https://doi.org/10.1007/s00429-014-0773-1>
- Amabile, T. M. (1983). The Social Psychology of Creativity: A Componential Conceptualization. *Journal of Personality and Social Psychology*, 45(2), 357-376.
- Amabile, T. M. (2013). Componential Theory of Creativity. *Encyclopedia of Management Theory*, 10.
- Amabile, T. M., Hill, K. G., Hennessey, B. A., and Tighe, E. M. (1994). The Work Preference Inventory : Assessing Intrinsic and Extrinsic Motivational Orientations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 66(5), 950-967.
- Ansburg, P. I., and Hill, K. (2003). Creative and analytic thinkers differ in their use of attentional resources. *Personality and Individual Differences*, 34(7), 1141-1152. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00104-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00104-6)
- Azouvi, P., Arnould, A., Dromer, E., and Vallat-Azouvi, C. (2017). Neuropsychology of traumatic brain injury : An expert overview. *Revue Neurologique*, 173(7-8), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2017.07.006>
- Azouvi, P., Couillet, J., Leclercq, M., Martin, Y., Asloun, S., and Rousseaux, M. (2004). Divided attention and mental effort after severe Traumatic Brain Injury. *Neuropsychologia*, 42, 1260-1268.
- Baddeley, A. D. (2000). The phonological loop and the irrelevant speech effect : Some comments on Neath (2000). *Psychonomic Bulletin and Review*, 7(3), 544-549. <https://doi.org/10.3758/BF03214369>
- Baddeley, A., and Della Sala, S. (1996). *Working memory and executive control*. 1397-1404.
- Benedek, M., Jurisch, J., Koschutnig, K., Fink, A., and Beaty, R. E. (2020). Elements of creative thought : Investigating the cognitive and neural correlates of association and bi-association processes. *NeuroImage*, 210, 10. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116586>
- Broadbent, D. E., Cooper, P. F., FitzGerald, P., and Parkes, K. R. (1982). The cognitive failures questionnaire (CFQ) and its correlates. *British journal of clinical psychology*, 21(1), 1-16.
- Bykova, M. V. (2019). *Detection of changes in brain structures on MRI for various diseases* [Master's thesis].
- Cao, X., Yao, Y., Li, T., Cheng, Y., Feng, W., Shen, Y., Li, Q., Jiang, L., Wu, W., Wang, J., Sheng, J., Feng, J., and Li, C. (2016). The Impact of Cognitive Training on Cerebral White Matter in Community-Dwelling Elderly : One-Year Prospective Longitudinal Diffusion Tensor Imaging Study. *Scientific Reports*, 6(1), 33212. <https://doi.org/10.1038/srep33212>
- Chen, L., Hu, X., Ouyang, L., He, N., Liao, Y., Liu, Q., Zhou, M., Wu, M., Huang, X., and Gong, Q. (2016). A systematic review and meta-analysis of tract-based spatial statistics studies regarding attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 68, 838-847. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.022>
- Christensen, H., Anstey, K. J., Leach, L. S., and Mackinnon, A. J. (2008). Intelligence, education, and the brain reserve hypothesis. In *The handbook of aging and cognition*, 3rd ed (p. 133-188). Psychology Press.
- Crawford, John R., and Garthwaite, P. H. (2005). Testing for Suspected Impairments and Dissociations in Single-Case Studies in Neuropsychology : Evaluation of Alternatives Using Monte Carlo Simulations and Revised Tests for Dissociations. *Neuropsychology*, 19(3), 318-331. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.19.3.318>
- Crawford, John R., Garthwaite, P. H., Azzalini, A., Howell, D. C., and Laws, K. R. (2006). Testing for a deficit in single-case studies : Effects of departures from normality. *Neuropsychologia*, 44(4), 666-677. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.06.001>

- Crawford, J.R., and Garthwaite, P. H. (2002). Investigation of the single case in neuropsychology : Confidence limits on the abnormality of test scores and test score differences. *Neuropsychologia*, 40(8), 1196-1208. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00224-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00224-X)
- De Dreu, C. K. W., Baas, M., and Nijstad, B. A. (2008). Hedonic tone and activation level in the mood-creativity link : Toward a dual pathway to creativity model. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94(5), 739-756. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.94.5.739>
- Draper, K., and Ponsford, J. (2008). Cognitive functioning ten years following traumatic brain injury and rehabilitation. *Neuropsychology*, 22(5), 618-625. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.5.618>
- Emmorey, K., Giezen, M. R., Petrich, J. A. F., Spurgeon, E., and O'Grady Farnady, L. (2017). The relation between working memory and language comprehension in signers and speakers. *Acta Psychologica*, 177, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.04.014>
- Engle, R. W., Kane, M. J., and 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 and P. Shah (Éds.), *Models of Working Memory* (p. 102-134). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.007>
- Engle, R. W., Laughlin, J. E., Tuholski, S. W., and Conway, A. R. A. (1999). *Working Memory, Short-Term Memory, and General Fluid Intelligence : A Latent-Variable Approach*. 23. <http://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.128.3.309>
- Feldman, H. M., Yeatman, J. D., Lee, E. S., Barde, L. H. F., and Gaman-Bean, S. (2010). Diffusion tensor imaging : A review for pediatric researchers and clinicians. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 31(4), 346-356. <https://doi.org/10.1097/DBP.0b013e3181dcaa8b>
- Flashman, L. A., and McAllister, T. W. (2002). Lack of awareness and its impact in traumatic brain injury. *NeuroRehabilitation*, 17(4), 285-296. <https://doi.org/10.3233/NRE-2002-17403>
- Forkel, S. J., Thiebaut de Schotten, M., Kawadler, J. M., Dell'Acqua, F., Danek, A., and Catani, M. (2014). The anatomy of fronto-occipital connections from early blunt dissections to contemporary tractography. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 56, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.09.005>
- Foster, C. M., Kennedy, K. M., Hoagey, D. A., and Rodrigue, K. M. (2019). The role of hippocampal subfield volume and fornix microstructure in episodic memory across the lifespan. *Hippocampus*, 29(12), 1206-1223. <https://doi.org/10.1002/hipo.23133>
- Hao, N., Yuan, H., Cheng, R., Wang, Q., and Runco, M. A. (2015). Interaction effect of response medium and working memory capacity on creative idea generation. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01582>
- Herbet, G., Moritz-Gasser, S., and Duffau, H. (2017). Direct evidence for the contributive role of the right inferior fronto-occipital fasciculus in non-verbal semantic cognition. *Brain Structure and Function*, 222(4), 1597-1610. <https://doi.org/10.1007/s00429-016-1294-x>
- Hübener, M., and Bonhoeffer, T. (2014). Neuronal plasticity : Beyond the critical period. *Cell*, 159(4), 727-737. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.035>
- Jang, S. H. (2009). A review of corticospinal tract location at corona radiata and posterior limb of the internal capsule in human brain. *NeuroRehabilitation*, 24(3), 279-283. <https://doi.org/10.3233/NRE-2009-0479>
- Johns, M. W. (1991). A new method for measuring day time sleepiness : The Epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14, 540-545.
- Johnson, V. E., Stewart, W., and Smith, D. H. (2013). Axonal pathology in traumatic brain injury. *Experimental Neurology*, 246, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.01.013>

- Jourdan, C., Bayen, E., Pradat-Diehl, P., Ghout, I., Darnoux, E., Azerad, S., Vallat-Azouvi, C., Charanton, J., Aegerter, P., Ruet, A., and Azouvi, P. (2016). A comprehensive picture of 4-year outcome of severe brain injuries. Results from the Paris-TBI study. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 59(2), 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.10.009>
- Jourdan, Claire, Bayen, E., Bosserelle, V., Azerad, S., Genet, F., Fermanian, C., Aegerter, P., Pradat-Diehl, P., Weiss, J.-J., Azouvi, P., and Members of the Steering Committee of the Paris-TBI Study. (2013). Referral to rehabilitation after severe traumatic brain injury : Results from the Paris-TBI Study. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 27(1), 35-44. <https://doi.org/10.1177/1545968312440744>
- Jung, Y. J., Jang, S. H., Yeo, S. S., Lee, E., Kim, S., Lee, D. G., Kim, H. S., and Son, S. M. (2012). Medial lemniscus lesion in pediatric hemiplegic patients without corticospinal tract and posterior thalamic radiation lesion. *European Neurology*, 67(4), 211-216. <https://doi.org/10.1159/000335872>
- Kinnunen, K. M., Greenwood, R., Powell, J. H., Leech, R., Hawkins, P. C., Bonnelle, V., Patel, M. C., Counsell, S. J., and Sharp, D. J. (2011). White matter damage and cognitive impairment after traumatic brain injury. *Brain*, 134(2), 449-463. <https://doi.org/10.1093/brain/awq347>
- Kraus, M. F., Susmaras, T., Caughlin, B. P., Walker, C. J., Sweeney, J. A., and Little, D. M. (2007). White matter integrity and cognition in chronic traumatic brain injury : A diffusion tensor imaging study. *Brain*, 130(10), 2508-2519. <https://doi.org/10.1093/brain/awm216>
- Lai, C.-H., and Wu, Y.-T. (2013). Fronto-occipital fasciculus, corpus callosum and superior longitudinal fasciculus tract alterations of first-episode, medication-naïve and late-onset panic disorder patients. *Journal of Affective Disorders*, 146(3), 378-382. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2012.09.022>
- LeBoutillier, N., and Marks, D. F. (2003). Mental imagery and creativity : A meta-analytic review study. *British Journal of Psychology*, 94(1), 29-44. <https://doi.org/10.1348/000712603762842084>
- Lubart, T. I., Mouchiroud, C., Tordjman, S., and Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité (2e édition augmentée)*. Paris: Armand Colin.
- Maclean, N. (2000). Qualitative analysis of stroke patients' motivation for rehabilitation. *BMJ*, 321(7268), 1051-1054. <https://doi.org/10.1136/bmj.321.7268.1051>
- Madore, K. P., Addis, D. R., and Schacter, D. L. (2015). Creativity and Memory : Effects of an Episodic-Specificity Induction on Divergent Thinking. *Psychological Science*, 26(9), 1461-1468. <https://doi.org/10.1177/0956797615591863>
- Madore, K. P., Jing, H. G., and Schacter, D. L. (2016). Divergent creative thinking in young and older adults : Extending the effects of an episodic specificity induction. *Memory and Cognition*, 44(6), 974-988. <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0605-z>
- Malaia, E., and Wilbur, R. B. (2019). Visual and linguistic components of short-term memory : Generalized Neural Model (GNM) for spoken and sign languages. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 112, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.05.020>
- Marquez de la Plata, C. D., Yang, F. G., Wang, J. Y., Krishnan, K., Bakhadirov, K., Paliotta, C., Aslan, S., Devous, M. D., Moore, C., Harper, C., McColl, R., Munro Cullum, C., and Diaz-Arrastia, R. (2011). Diffusion Tensor Imaging Biomarkers for Traumatic Axonal Injury : Analysis of Three Analytic Methods. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(01), 24-35. <https://doi.org/10.1017/S1355617710001189>
- Martindale, C. (2007). Creativity, primordial cognition, and personality. *Personality and Individual Differences*, 43(7), 1777-1785. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2007.05.014>
- Mazaux, J.-M., Masson, F., Levin, H. S., Alaoui, P., Maurette, P., and Barat, M. (1997). Long-term neuropsychological outcome and loss of social autonomy after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(12), 1316-1320. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90303-8](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90303-8)

- Mendelsohn, G. A. (1976). Associative and attentional processes in creative performance1. *Journal of Personality*, 44(2), 341-369. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1976.tb00127.x>
- Menegaux, A., Meng, C., Neitzel, J., Bäuml, J. G., Müller, H. J., Bartmann, P., Wolke, D., Wohlschläger, A. M., Finke, K., and Sorg, C. (2017). Impaired visual short-term memory capacity is distinctively associated with structural connectivity of the posterior thalamic radiation and the splenium of the corpus callosum in preterm-born adults. *NeuroImage*, 150, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.02.017>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., and Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks : A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Mori, S., Oishi, K., Jiang, H., Jiang, L., Li, X., Akhter, K., Hua, K., Faria, A. V., Mahmood, A., Woods, R., Toga, A. W., Pike, G. B., Neto, P. R., Evans, A., Zhang, J., Huang, H., Miller, M. I., van Zijl, P., and Mazziotta, J. (2008). Stereotaxic white matter atlas based on diffusion tensor imaging in an ICBM template. *NeuroImage*, 40(2), 570-582. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.12.035>
- Mori, S., Wakana, S., Van Zijl, P. C., and Nagee-Poetscher, L. M. (2005). *MRI atlas of human white matter*. Elsevier.
- Pirson, M., Langer, E. J., Bodner, T., and Zilcha, S. (2012). The Development and Validation of the Langer Mindfulness Scale—Enabling a Socio-Cognitive Perspective of Mindfulness in Organizational Contexts. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2158921>
- Plaisant, O., Courtois, R., Réveillère, C., Mendelsohn, G. A., and John, O. P. (2010). Validation par analyse factorielle du Big Five Inventory français (BFI-Fr). Analyse convergente avec le NEO-PI-R. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 168(2), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2009.09.003>
- Rodrigo, S., Oppenheim, C., Jissendi, P., Soto-Ares, G., Pruvo, J.-P., and Meder, J.-F. (2008). Nouvelles techniques d’IRM morphologique et fonctionnelle. *Neurochirurgie*, 54(3), 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2008.02.037>
- Rutgers, D. R., Fillard, P., Paradot, G., Tadié, M., Lasjaunias, P., and Ducreux, D. (2008). Diffusion Tensor Imaging Characteristics of the Corpus Callosum in Mild, Moderate, and Severe Traumatic Brain Injury. *American Journal of Neuroradiology*, 29(9), 1730-1735. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A1213>
- Saggar, M., Quintin, E.-M., Bott, N. T., Kienitz, E., Chien, Y., Hong, D. W.-C., Liu, N., Royalty, A., Hawthorne, G., and Reiss, A. L. (2017). Changes in Brain Activation Associated with Spontaneous Improvization and Figural Creativity After Design-Thinking-Based Training : A Longitudinal fMRI Study. *Cerebral Cortex*, 27, 3542-3552. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw171>
- Schmahmann, J. D. (2019). The cerebellum and cognition. *Neuroscience Letters*, 688, 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.07.005>
- Simblett, S. K., and Bateman, A. (2011). Dimensions of the Dysexecutive Questionnaire (DEX) examined using Rasch analysis. *Neuropsychological rehabilitation*, 21(1), 1-25.
- Surbeck, W., Hänggi, J., Scholtes, F., Viher, P. V., Schmidt, A., Stegmayer, K., Studerus, E., Lang, U. E., Riecher-Rössler, A., Strik, W., Seifritz, E., Borgwardt, S., Quednow, B. B., and Walther, S. (2020). Anatomical integrity within the inferior fronto-occipital fasciculus and semantic processing deficits in schizophrenia spectrum disorders. *Schizophrenia Research*, 218, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2019.12.025>
- Teasdale, T. W., and Engberg, A. W. (2005a). Psychosocial consequences of stroke : A long-term population-based follow-up. *Brain Injury*, 19(12), 1049-1058. <https://doi.org/10.1080/02699050500110421>
- Teasdale, T. W., and Engberg, A. W. (2005b). Subjective well-being and quality of life following traumatic brain injury in adults : A long-term population-based follow-up. *Brain Injury*, 19(12), 1041-1048. <https://doi.org/10.1080/02699050500110397>

- Torrance, E. P. (1979). *The search for satori and creativity* Creative Education Foundation. Inc., Buffalo, New York.
- Torrance, E. P. (2008). *Torrance Tests of Creative Thinking : Norms-technical manual verbal forms A and B*. Scholastic Testing Service.
- Torrance, E. P. (2017). *Torrance Tests of Creative Thinking : Streamlined scoring guide for figural forms A and B*. Scholastic Testing Service.
- Vallat-Azouvi, C. (2019). *Evaluation et rééducation de patients victimes de lésions cérébrales acquises non dégénératives* [Note de sythèse pour l'obtention d'une HDR]. Paris 8.
- Vallat-Azouvi, C., Pradat-Diehl, P., and Azouvi, P. (2012). The Working Memory Questionnaire : A scale to assess everyday life problems related to deficits of working memory in brain injured patients. *Neuropsychological Rehabilitation, 22*(4), 634-649. <https://doi.org/10.1080/09602011.2012.681110>
- Westerberg, H., Jacobaeus, H., Hirvikoski, T., Clevberger, P., Östenson, M.-L., Bartfai, A., and Klingberg, T. (2007). Computerized working memory training after stroke—A pilot study. *Brain Injury, 21*(1), 21-29. <https://doi.org/10.1080/02699050601148726>

Partie 3 : Synthèse et discussion

Synthèse

Ce manuscrit est composé d'une première partie dédiée à la créativité, comment elle est définie et étudiée et comment elle peut être entraînée, ainsi que d'une seconde partie axée sur le Traumatisme Crânien et comment les processus créatifs pourraient aider à proposer une rééducation plus adaptée et donc efficace. En effet, démontrer l'intérêt de l'utilisation de la créativité dans un programme de rééducation holistique du patient TC est le fondement même de mon travail de thèse, abordé à travers les études 1, 2 et 3.

La revue de littérature décrite dans la Partie 1 nous a permis de montrer que la créativité est sous-tendue par une multitude de facteurs variés qui peuvent être d'ordre cognitif, physiologique, émotionnel, psychologique, ou bien encore environnemental. De plus, ces facteurs peuvent interagir entre eux, comme le proposent les modèles de Lubart et collaborateurs (2003) et d'Amabile (1983 ; 1988) ce qui ajoute un niveau de complexité à l'étude de l'influence de ces facteurs sur la créativité. Et pourtant, les études menées en créativité qui mettent en parallèle des aspects physiologiques et cognitifs, ne prennent que très peu en compte ces interactions.

C'est sur la base de ce constat que nous avons choisi d'étudier chez des sujets sains la connectivité fonctionnelle au repos en lien avec non pas la créativité seule, mais avec un modèle de fonctionnement cognitif qui rendrait compte du potentiel créatif des sujets, incluant des fonctions décrites comme en lien favorable ou non avec la créativité. Ce travail présenté dans **l'étude 1**, en accord avec la littérature, a mis en évidence que la mémoire de travail est essentielle à la créativité. Ce travail a également démontré que le réseau attentionnel de repos est lié à ce fonctionnement cognitif particulier qui permet aux individus d'être plus créatifs. Etant donné le rôle prépondérant de l'attention dans tout fonctionnement cognitif mais aussi la part importante de la littérature sur la créativité identifiant les capacités attentionnelles comme jouant un rôle central dans les processus créatifs, ce résultat ne nous a pas surpris contrairement à son absence dans les études alliant créativité et aspects physiologiques.

Nous pensons donc qu'il faudrait étudier le potentiel créatif des individus plutôt qu'une mesure unique de créativité afin de mieux appréhender la complexité des interactions cognitives.

En partant de cette hypothèse, dans **l'étude 2**, nous nous sommes intéressés à l'impact d'un entraînement exécutif basé sur la résolution de problèmes fermés complexes sur le fonctionnement cognitif et physiologique de sujets adultes sains (20-50 ans). Ce travail a permis de montrer que cet entraînement améliore non seulement le fonctionnement cognitif mais aussi les capacités d'innovation des participants, et que cette amélioration s'accompagne d'une modification de la connectivité cérébrale au repos et plus particulièrement du DMN, de l'AN et du VN. Ces résultats montrent ainsi que cet entraînement est capable d'induire des modifications cognitives et cérébrales reflétant une amélioration du potentiel créatif de l'individu.

La complexité qui entoure la créativité, peut apparaître a priori comme un obstacle important pour ceux qui souhaiteraient en faire leur objet d'étude mais, d'un autre côté, elle peut être prise comme une extraordinaire chance d'accéder au potentiel créatif d'un individu. En effet, tous les facteurs en lien avec la créativité peuvent être vus comme autant de « portes d'entrée » donnant accès à cette capacité. Et dans le domaine particulier de la réhabilitation du sujet TC, cette multitude de « portes » offre autant d'opportunités de pouvoir stimuler la créativité dont les patients les plus touchés ont tant besoin pour se réinventer après leur trauma. Ces opportunités permettent d'introduire la stimulation de la créativité au sein d'une prise en charge holistique en pouvant personnaliser au maximum l'approche proposée au sujet.

Ainsi, en nous appuyant sur cette idée et sur les données de l'étude 2, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'introduction dans notre entraînement holistique d'exercices ciblant principalement des mécanismes impliqués dans la créativité adaptative tels que la mémoire de travail, l'imagerie mentale, la fluence, la flexibilité mentale, l'inhibition..., devrait faciliter le déploiement de l'inventivité et de la sortie de cadre, et permettre ainsi une meilleure progression des patients TC et un meilleur maintien des bénéfices obtenus. L'hypothèse sous-jacente est que

l'inventivité et la sortie de cadre procureront au patient un « terrain cognitif riche » qui augmentera sa production intellectuelle et favorisera l'utilisation de nouvelles stratégies qui, nous l'espérons, seront transférées à la vie quotidienne et utilisées par le sujet pour résoudre des problèmes quotidiens. Ainsi, les résultats préliminaires de **l'étude 3** indiquent que chez les 3 patients TC chroniques testés, il y a des améliorations cognitives globales sous-tendues par des modifications anatomiques suite à l'entraînement holistique basé sur la créativité. Nous avons démontré que selon la durée post-traumatique, la rééducation n'a pas les mêmes bénéfices et qu'il faut en fonction de ce constat adapter l'entraînement pour l'orienter plutôt vers une prise en charge cognitive chez les patients en début de phase chronique pour par la suite incrémenter graduellement des prises en charge de la gestion émotionnelle et de la métacognition dès que le patient est capable de prendre du recul face à sa propre situation et d'entamer une introspection suffisante. Par ailleurs, nous avons pointé l'existence d'une possible phase charnière concernant la maturité du patient vis à vis de ces troubles. Cette maturité tout comme la motivation dont il fait preuve sont nécessaires pour une prise en charge holistique réussie.

Discussion

Nous allons tenter ici de mettre en perspective les différents résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse, en ayant un regard critique quant à leur apport dans l'amélioration de la prise en charge clinique des patients TC.

Dans une première partie je détaillerais l'implication de certains réseaux de repos dans la créativité par rapport aux résultats que nous avons obtenus lors de nos deux premières études. Puis dans une seconde partie, j'aborderai les points intéressants qui m'ont amené à reconsidérer ma vision de la créativité vers un modèle de « niche créative ». Ensuite, lors d'un troisième point j'aborderai l'impact de notre rééducation holistique et les répercussions que cela peut avoir dans le cadre de ce modèle de niche créative. Puis, compte tenu de nos résultats et de la revue de littérature, nous ferons une critique objective des mesures en DTI, et enfin je conclurai sur l'ensemble de ces travaux de thèse.

I. Quels sont les réseaux de l'activité cérébrale de repos les plus en lien avec la créativité ?

Comme nous l'avons vu, la créativité émerge grâce à un ensemble de facteurs qui interagissent entre eux. Le lien entre chacun de ces facteurs et la créativité est bien décrit dans la littérature. Les études sur le fonctionnement cérébral de repos lié à la créativité ont mis en évidence 3 réseaux de repos comme étant associé à une forte expression de la créativité, à savoir le DMN, l'ECN et le SN. Malgré cela, notre revue de la littérature nous a permis de pointer plusieurs faiblesses qui nous ont amené à élaborer notre première étude.

Rappelons que la majorité des travaux sur les relations qui peuvent exister entre l'activité cérébrale de repos et la créativité s'est principalement intéressée à une seule performance créative mise en regard de tests cognitifs, de traits de personnalité, de contraintes environnementales, ou encore d'un fonctionnement cérébral. Il est surprenant que l'interaction entre ces différentes mesures ait été rarement prise en compte au vu de la richesse des interactions à l'origine de la

créativité et surtout, qu'un focus ait été mis sur un seul de ses aspects. En effet, la différenciation des niveaux de créativité se faisant à partir d'une simple performance à une tâche créative qui, en soi, est une tâche exécutive nécessitant par voie de conséquence l'activation de fonctions exécutives inhérentes à toute tâche, nous estimons que les résultats en IRMf de repos, dans le cadre de la créativité, reflètent davantage une facilité à réaliser une tâche exécutive plutôt que des mécanismes spécifiques de la créativité. Si on ajoute à cela, l'importante littérature stipulant que les processus attentionnels et la mémoire de travail sous-tendent la créativité, il en ressort que les données de connectivité fonctionnelle de l'état de repos ne sont pas en totale cohérence avec les données cognitives. En effet, le réseau attentionnel n'est pas ou très peu mis en avant. Les réseaux de repos sont le reflet d'un fonctionnement inné, inhérent à l'individu qui peut donc réellement rendre compte d'une certaine prédisposition à la créativité. Il a donc paru important dans un premier temps d'évaluer l'implication de l'AN dans l'expression de la créativité.

C'est pourquoi lors d'une première étude nous avons choisi de mettre un fonctionnement cognitif en parallèle d'un fonctionnement cérébral afin de mettre en lumière des différences cognitives et physiologiques à l'origine de la créativité. Le modèle cognitif et l'approche que nous avons utilisés sont pertinents puisque nous avons confirmé l'implication de certains processus cognitifs ainsi que l'implication de réseaux de repos. En effet, nous avons confirmé que la mémoire de travail était impliquée dans les processus créatifs, qui comme nous avons pu le voir dans l'Approche par la *Personne* (Partie 1, chapitre 1) est un élément de base de la créativité permettant de maintenir des informations disponibles afin de permettre à l'individu de s'en resservir. De plus, au niveau de la connectivité fonctionnelle nous avons également confirmé l'implication du DMN qui comme nous avons pu le voir dans l'Approche par la *Physiologie* (Partie 1, chapitre 1) est impliqué dans les processus de rêve éveillé et « d'errance de la pensée » (Andrews-Hanna et al., 2014; Beaty et al., 2014; Godwin et al., 2017) qui sont nécessaires à une étape bien particulière du processus créatif, l'illumination ou « insight » en anglais (Barbey et al., 2013; Ogawa et al., 2018; Takeuchi et

al., 2012; Wu et al., 2016). Ces processus reposent sur la mémoire de travail et renforcent son lien avec la créativité. Cependant, le point qui dans notre étude diffère avec la littérature c'est que nous avons mis en évidence l'implication du réseau de repos de l'attention. Il est impliqué dans des mécanismes d'attention, d'imagerie mentale et de mémoire de travail (Mechelli, 2004; Nęcka et al., 2016). Ces processus sont en lien avec la créativité, notamment l'imagerie mentale qui sous-tend la pensée divergente figurale (LeBoutillier and Marks, 2003). Ce résultat est confirmé par notre étude 2 sur l'entraînement en résolution de problèmes qui montre une augmentation de la connectivité de l'AN et du DMN accompagnée d'un changement du fonctionnement cognitif en faveur de la flexibilité cognitive suite à l'entraînement. Comme nous l'avons vu dans la première partie, la mémoire de travail repose sur trois piliers : la flexibilité, la mise à jour et l'inhibition, dont la flexibilité selon Miyake et collaborateurs (2000) repose sur un mécanisme d'attention contrôlée. Ainsi, ces deux études sont en accord avec les théories cognitivistes qui pointent l'implication de la mémoire de travail et de l'attention. Donc, mettre en parallèle un fonctionnement cognitif et un fonctionnement cérébral permet de retrouver une cohérence entre les données cognitives et la connectivité fonctionnelle de repos.

Par ailleurs lors de l'étude 2, nous avons entraîné les participants en résolution de problème grâce notamment à la mise en place de stratégies utilisant l'imagerie mentale qui peut largement expliquer à elle seule l'augmentation de la connectivité au sein du réseau visuel. Par conséquent, nous pensons que les réseaux de repos strictement liés au potentiel créatif du sujet serait l'AN et le DMN, le réseau visuel étant spécifique de la modalité avec laquelle nous avons entraîné les sujets. Ainsi, l'approche par le fonctionnement cognitif qui permet de se concentrer sur le potentiel créatif de l'individu via plusieurs processus sous-jacents, nous a permis de nous affranchir de l'effet de la tâche créative. De futures études devront confirmer l'efficacité de cette approche en la mettant à l'épreuve dans des contextes différents.

II. Notre apport aux modèles de créativité

Comme nous l'avons abordé dans la Partie 1, la performance créative d'un individu peut être très variable car elle dépend à chaque instant de facteurs internes et externes. Lubart et collaborateurs (2003) décrivent le potentiel créatif comme étant sous-tendu par des facteurs cognitifs, psychologiques, émotionnels et environnementaux, ce qui transcrit bien la richesse et la diversité des facteurs qui entrent en jeu. Le « potentiel » est défini dans le dictionnaire Larousse comme un « ensemble des ressources dont quelqu'un, une collectivité, un pays peut disposer ». Ainsi le « potentiel créatif » peut être défini comme « l'ensemble des ressources dont l'individu dispose pour atteindre sa capacité maximale de créativité ». Contrairement à cette définition, nous pensons que l'ensemble des ressources disponibles n'est pas forcément nécessaire à l'expression du potentiel créatif et qu'il y aurait un choix des ressources à opérer. De plus, il nous semble également important d'aborder les facteurs environnementaux de façon différente des autres facteurs, en distinguant ceux qui sont « invariants » et intrinsèques à l'individu tels que sa culture et son éducation, de ceux qui sont « variants » tels que le climat, les odeurs ou encore les sons entendus. Pour nous, les facteurs environnementaux « variants » ne composent pas le potentiel créatif mais seraient une condition qui le module. En effet, le potentiel créatif peut plus ou moins s'exprimer et cela va dépendre de certaines conditions. Ces conditions sont des facteurs qui varient en tout temps et qui viennent influencer la mise en action de ce potentiel. Cette dichotomie des facteurs me fait beaucoup penser au concept de « niche écologique ». En effet, la niche écologique est décrite comme « un espace abstrait dont les axes représentent tous les facteurs qui vont affecter l'existence de l'être vivant et donc conduire soit à son maintien soit à sa disparition » (Holt, 2009). Il existe deux types de facteurs : les ressources (ce qui permet son existence) et les conditions (ce qui influence sa survie). Ainsi, en analogie avec ce concept on pourrait décrire le potentiel créatif comme étant l'ensemble des ressources dont dispose l'individu et les ressources sélectionnées

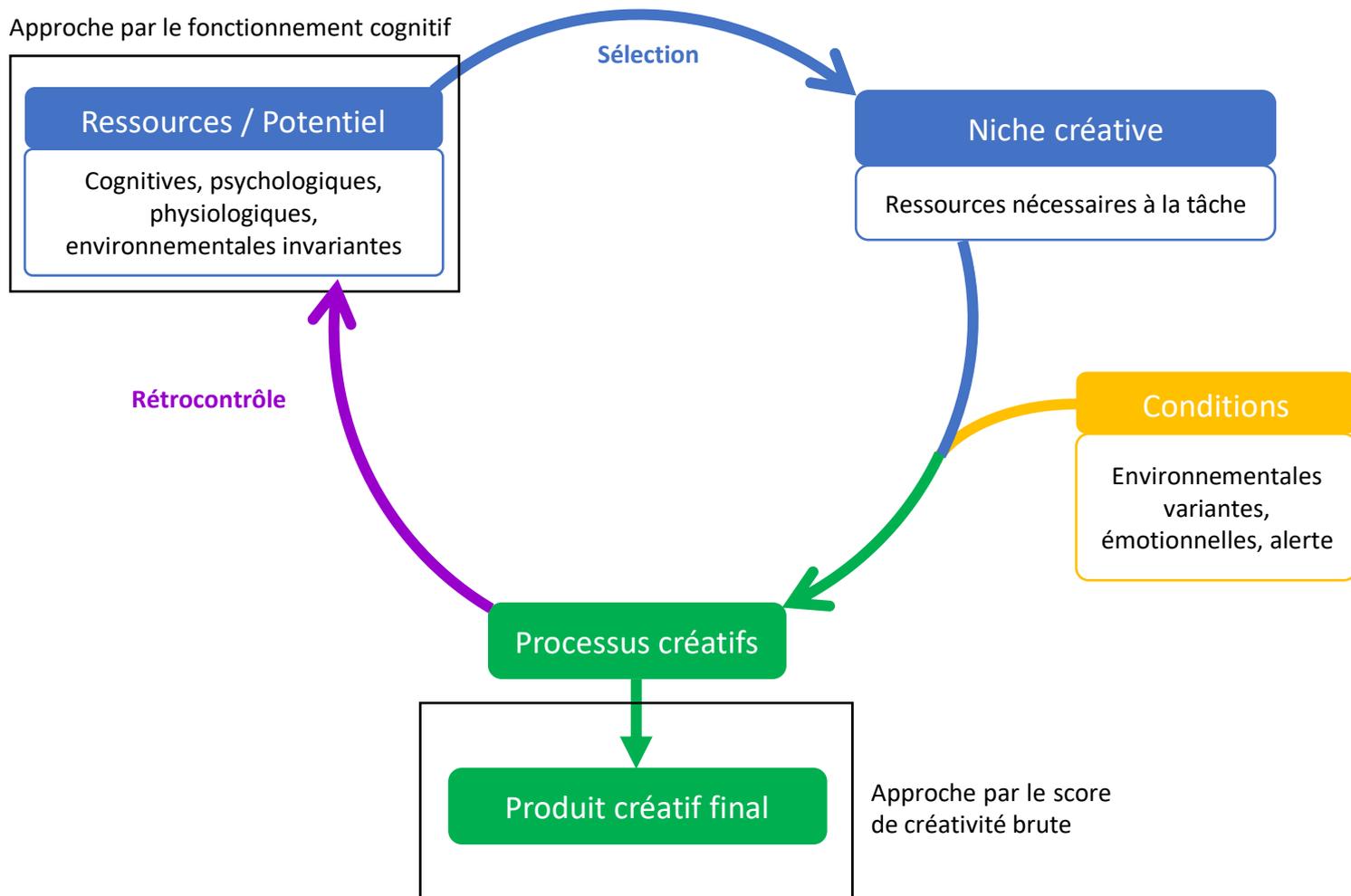
constitueraient la niche créative (figure 7). La mise en jeu de cette dernière peut être influencée par des conditions. Ici, les ressources font donc références aux facteurs psychologiques, physiologiques, cognitifs et environnementaux invariants. Et à nos yeux, les conditions font, elles, références aux facteurs environnementaux variants mais également à des facteurs internes à l'individu tel que l'affect, le stress, et l'alerte. De plus, l'efficacité des processus créatifs mis en action pour aboutir à une production créative, va dépendre de la niche créative et des conditions. A la sortie du processus créatif, le produit peut ne pas être bon, à ce moment-là un rétrocontrôle a lieu permettant une adaptation de la sélection des ressources et une remise en route du processus créatif. Cette boucle itérative a lieu jusqu'à ce que le meilleur produit créatif soit trouvé. Comme nous l'avons vu dans la Partie 1 (chapitre 1), les processus créatifs sont variables et différents modèles existent pour les caractériser (Wallas, Geneplore, A-GC). Selon moi, tous les modèles proposés sont vrais, mais n'ont pas lieu en même temps, ils dépendent de la façon dont le potentiel créatif est mis en jeu suite à la sélection et sous l'effet des conditions. Dans ce contexte, un facteur critique est une ressource ou une condition qui, par son absence ou sa présence, aura un fort impact sur la créativité. Par exemple, les résultats de l'étude 1 confirment le rôle primordial de la mémoire de travail dans la créativité, qui, du point de vue du concept de niche créative, en fait un facteur critique. Ainsi, nous comprenons bien qu'il n'y a pas qu'une seule façon d'exprimer la créativité dans la mesure où nous pouvons mettre en jeu différentes ressources et conditions via différents processus.

A mon sens, cette vision conceptuelle permet de mieux cerner toute la complexité des processus nécessaires à l'aboutissement de la créativité. Sur cette base, étudier la créativité au travers du fonctionnement cognitif permet de s'affranchir de la sélection et des conditions pour rendre compte du potentiel créatif du participant. Mais je pense qu'il sera primordial de se lancer dans des modélisations plus larges des facteurs de la créativité afin d'identifier la part de l'impact de chacune des étapes (sélection, mise en œuvre, processus créatif et rétroaction) en étudiant dans un premier

temps l'interaction entre les différentes ressources, puis dans un second temps d'essayer de les mettre en perspective avec les conditions.

Figure 7 : Concept de la niche créative

Les ressources sont propres à l'individu et constituent le potentiel créatif. Une sélection des ressources nécessaires à la tâche créative a lieu afin de constituer la niche créative. Les conditions peuvent varier et influencer positivement ou négativement la mise en jeu de la niche créative, impactant donc les processus créatifs et le produit. Par une approche cognitive globale on s'affranchi de la sélection des ressources, de l'influence des conditions et des processus créatifs pour rendre compte du potentiel créatif de l'individu.



Afin de confirmer cette théorie de niche créative, il faudra d'une part mettre en évidence ce mécanisme de sélection des ressources, et d'autre part étudier le rétrocontrôle cognitif qui permet d'adapter la sélection des bonnes ressources. Par ailleurs, les stéréotypes façonnent notre vision des choses de façon inconsciente. Nous pensons qu'il serait intéressant d'étudier les effets du stéréotype en créativité, notamment pour ce qui est des différences d'âge et de genre.

Au cours de ma thèse, j'ai eu l'occasion de présenter mes travaux sur la créativité lors de congrès non spécifique, et j'ai été confrontée à une certaine dévaluation de cette thématique de travail qui était vu comme une recherche non centrale et de loisir. Ce travail de thèse permet, à mon sens, de se rendre compte des applications possibles en clinique. En effet, une étude réalisée au laboratoire (Ferrer, 2013) a montré que la résilience, qui est la capacité de rebondir favorablement après un évènement, était corrélée à la créativité. Ce résultat laisse entrevoir les applications possibles en rééducation pour favoriser la réinsertion socio-professionnelle de patients.

III. Niche créative et rééducation holistique centrée sur la créativité

Dans ce contexte, dans une troisième étude, nous avons mis en place une rééducation centrée sur la créativité en travaillant notamment la résolution de problèmes fermés, pour essayer de répondre au mieux à la problématique du sujet TC en particulier pour notre étude, mais de manière générale pour toutes pathologies cérébrales suite auxquelles les patients doivent « se réinventer » partiellement voire totalement. Dans cette étude nous avons stimulé la créativité en parallèle de nombreux autres aspects : 1) un aspect cognitif ciblant les troubles propres à chaque sujet et utilisant également les fonctions préservées de chacun, 2) une approche de métacognition pour aider les patients à mieux appréhender le travail qui leur était demandé et comment y parvenir, 3) un travail sur la gestion émotionnelle et 4) un travail sur la focalisation attentionnelle qui comme nous l'avons vu tout au long de ce manuscrit est un processus cognitif clef pour la créativité.

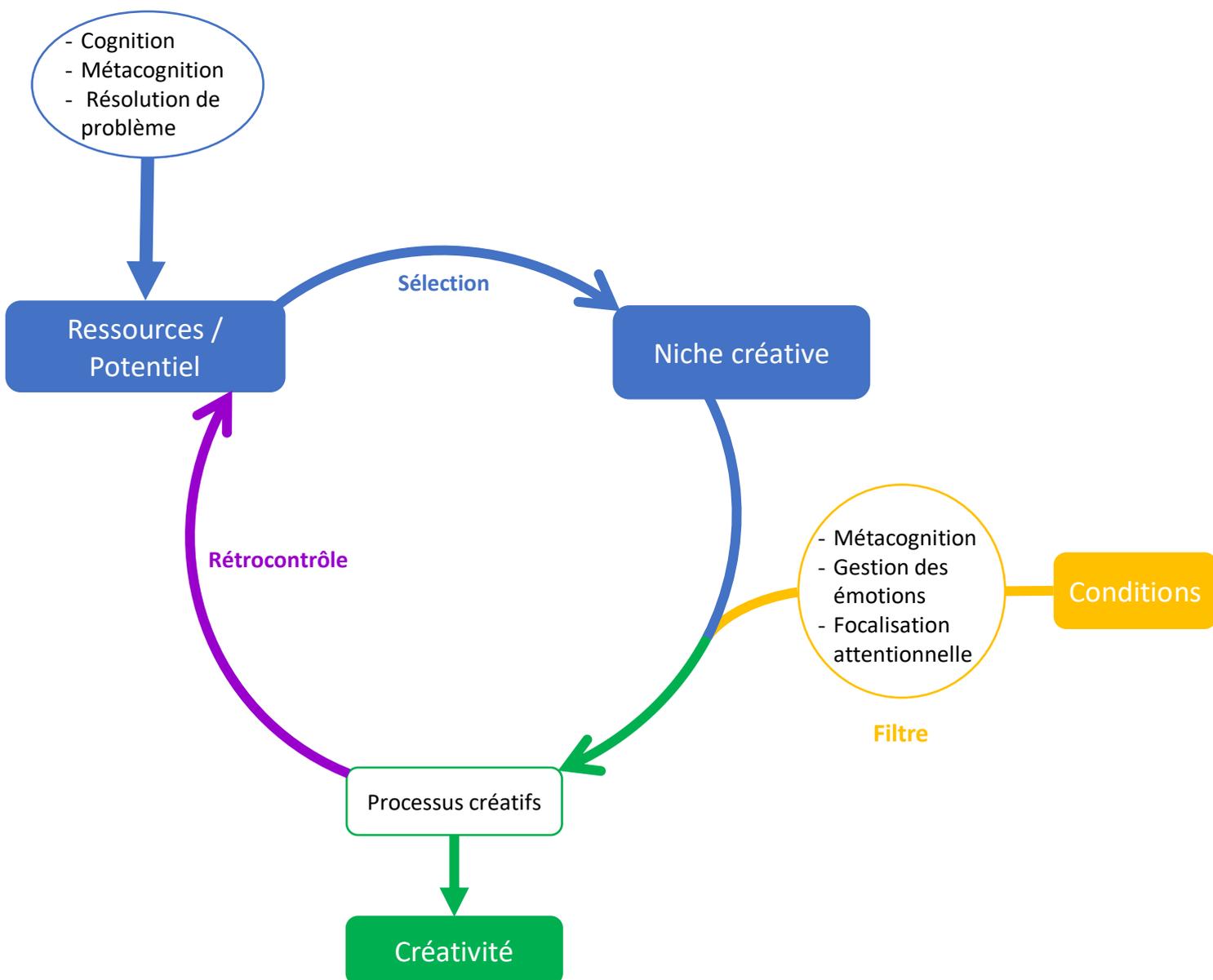
Si on positionne cet entraînement dans le cadre du concept de « niche créative » développé plus haut, on observe qu'il agit à la fois sur les ressources et sur les conditions. D'une part, les ressources vont être augmentées par l'amélioration des capacités cognitives et par la compréhension que le sujet en a. D'autre part, un filtrage des conditions va avoir lieu par la métacognition, la gestion émotionnelle et la focalisation attentionnelle, qui vont permettre au sujet de mieux se connaître, et

mieux réagir face aux conditions qu'il subit en minimisant leur impact négatif et en potentialisant leur impact positif (figure 8).

Figure 8 : Impact de l'entraînement

Dans ce schéma, les bulles font référence aux éléments ciblés par notre entraînement.

En entraînant la cognition, la métacognition et la résolution de problème, nous agissons à la fois sur les ressources et sur les conditions. D'une part, les ressources vont être augmentées par l'amélioration des capacités cognitives et la compréhension que le sujet en a. De plus, un filtrage des conditions a lieu par la métacognition, la gestion des émotions et la focalisation attentionnelle, qui permettent au sujet de mieux se connaître, et mieux réagir face aux conditions qu'il subit afin de minimiser leur impact négatif et potentialiser leur impact positif.



Les résultats obtenus dans l'étude 3 montrent qu'il y aurait, dans la phase chronique, une période critique propice à un certain type de rééducation des patients. En effet, suite à un traumatisme des phénomènes de plasticité cérébrale spontanée à très court terme sont mis en jeu afin de pallier les déficits (Bernier and Hillary, 2019; DeFina et al., 2009), permettant ainsi une première récupération du patient. D'autres phénomènes plastiques de nature différente s'étendent heureusement au-delà des périodes critiques et sont présents en phase chronique. Parmi nos sujets, le patient 012, qui se trouve à deux ans de son TC, est en phase chronique mais dans une fenêtre de temps que nous pensons suffisamment proche de son TC pour permettre à notre rééducation holistique d'impacter positivement sur les phénomènes plastiques toujours présents. Ce délai entre le TC et la rééducation semble donc être un avantage à la récupération du patient. Cependant, ce patient qui est au début de sa phase chronique ne fait face à ses déficits que depuis très peu de temps. Il connaît donc très mal ses déficits, il est encore dans une période d'accoutumance et y faire face nécessite une adaptation constante, induisant une forte charge mentale lui laissant ainsi peu de place pour de la gestion des émotions et de la métacognition au quotidien. C'est pourquoi nous pensons que la métacognition et surtout la gestion émotionnelle n'ont pas eu l'impact escompté. Ces résultats mis en perspective avec le concept de la niche créative, nous permettent de mieux comprendre pourquoi malgré une bonne récupération cognitive, les capacités créatives de ce sujet n'ont pas été améliorées. En effet, le patient a été réceptif à l'approche cognitive et créative, augmentant ainsi le niveau de ses ressources disponibles et donc son potentiel créatif. En revanche, il ne semble pas encore prêt à assimiler les informations vues en métacognition, de même que pour lui la gestion émotionnelle reste un exercice trop compliqué à mettre en jeu. Ainsi, il est évident que le filtre que forment ces deux facteurs n'a pas pu être mis en place et donc laissent les conditions interférer dans la mise en jeu de la « niche créative ». En revanche, ce n'est pas le cas pour un patient qui est à un délai post-traumatique plus long. En effet, ses déficits étant installés depuis longtemps, il a appris à vivre avec et leur gestion lui demande donc moins de charge mentale, le rendant donc plus disponible à l'apprentissage de nouvelles informations. De plus, comme il se

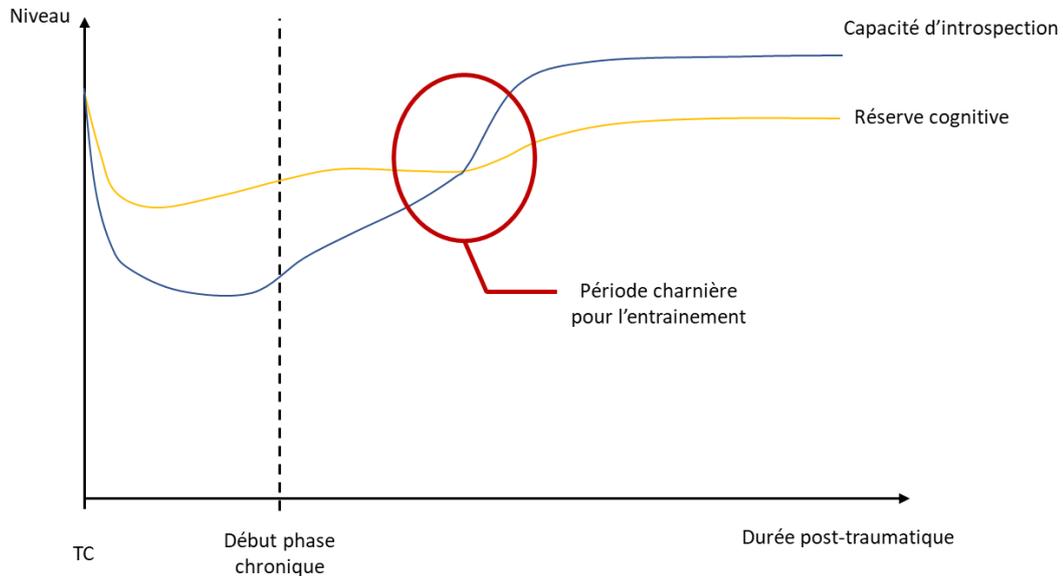
connaît mieux, il est plus à même de gérer ses émotions. Ainsi, pour des patients comme *011* et *013*, le filtrage des conditions est efficace et permet une amélioration de la créativité qui est soutenue par une amélioration cognitive globale pour le patient *013*. En revanche, pour la patiente *011*, qui à la base ne présentait aucun déficit cognitif, l'impact de cet entraînement est beaucoup plus ténu, se traduisant uniquement par une amélioration du filtrage des conditions.

Au niveau anatomique, nos résultats ont mis en évidence que pour le patient en début de phase chronique la FA permettait de rendre compte des améliorations cognitives du patient, de même que l'AD. En revanche, chez les patients à un délai post-traumatique plus long, la FA semble de moins en moins rendre compte des améliorations cognitives, au profit de l'AD et de la MD. La RD est une mesure qui rend bien compte des déficits des patients mais qui ne semble pas être sensible à l'entraînement. La RD est proportionnelle à la démyélinisation, ainsi on peut supposer que l'entraînement n'intervient pas sur les processus de myélinisation. En revanche, la AD et la MD rendent compte du dommage axonal. Ainsi, nous pouvons supposer que dans le cadre de patients en phase chronique, il y aurait une repousse axonale qui sous-tendrait les modifications cognitives et comportementales des patients, favorisant le maintien à long terme de ces modifications, ce qui, pour le patient *013*, a été propice à sa réinsertion professionnelle. Au vu des résultats de cette étude, nous pensons que plus le patient est loin de son traumatisme, plus il est difficile d'induire des modifications anatomiques, même avec une prise en charge riche et de longue durée comme la nôtre. De nombreuses études ont pointés que la plasticité cérébrale avait une période critique lors du développement mais que par la suite, dans un cerveau mature elle restait assez limitée (Hübener and Bonhoeffer, 2014). De plus, même dans le cas de pathologies, comme le TC qui stimule la plasticité cérébrale, elle reste assez limitée puisqu'elle ne permet pas une récupération complète du patient. Cette plasticité cérébrale est intimement liée à la réserve cognitive puisque, selon les modèles passifs, elle constitue la réserve statique, en opposition à la réserve dynamique soutenue par le fonctionnement cognitif (Alescio-Lautier et al., 2012). La réserve cognitive est liée à

notre patrimoine génétique de base, mais également à tous nos événements de vie qui vont impacter le fonctionnement cognitif et l'anatomie cérébrale (éducation, profession, entraînement, apprentissage ou lésions) (Christensen et al., 2008). Ainsi, nous pensons que la réserve cognitive est durement impactée lors d'un traumatisme crânien et qu'elle continue de l'être par la suite. Au même titre, la capacité d'introspection qui dépend de la connaissance que le sujet a de lui-même est fortement impactée suite au TC. Puis, progressivement, les patients vont réapprendre à se connaître et ainsi, ré-augmenter leur capacité d'introspection. Nous pensons donc qu'il y aurait une « période charnière » en phase chronique pendant laquelle la réserve cognitive du patient est suffisante, et sa connaissance de lui-même revenue à un niveau suffisant pour permettre une potentialisation optimale de l'entraînement que nous proposons (figure 9). Dans cette optique-là, il faudrait effectuer un entraînement progressif qui avant cette période charnière serait centré sur un recrutement progressif des processus cognitifs (difficulté croissante), puis des processus créatifs et enfin tendre progressivement vers une approche plus centrée sur la métacognition et la gestion émotionnelle au fur et à mesure que l'on se rapproche de la « période charnière ». Au vu des résultats de la patiente 011 et compte tenue de cette hypothèse, nous pensons que son TC ayant eu lieu lorsqu'elle était très jeune (15 ans), sa réserve cognitive n'a pas eu le temps de se constituer pleinement. Ainsi, son niveau de réserve cognitive ne serait pas suffisant pour induire les modifications cognitives nécessaires à l'amélioration de ses capacités créatives et donc de sa résilience. De futures études doivent être envisagées afin de tester cette hypothèse de « période charnière » en phase chronique.

Figure 9 : Représentation schématique de la « période charnière » et de l'effet de l'entraînement.

Suite au traumatisme, la réserve cognitive et la capacité d'introspection du sujet diminuent fortement. En phase sub-aigüe la rééducation initiale permet une amélioration de la réserve cognitive qui va se stabiliser en phase chronique. La capacité d'introspection va elle commencer à augmenter à la fin de la rééducation initiale et poursuivre son augmentation dans la phase chronique. Le point de convergence entre le niveau de réserve cognitive et le niveau de la capacité d'introspection constitue la période charnière pendant laquelle l'entraînement holistique doit être prodigué en phase chronique. L'entraînement va induire une augmentation plus marquée encore de la capacité d'introspection ainsi qu'une augmentation de la réserve cognitive.



IV. Critique des mesures de diffusion

Le TC étant une pathologie qui touche principalement la matière blanche, nous nous sommes naturellement intéressés à la technique de DTI qui permet de rendre compte de l'intégrité des fibres de la matière blanche par quatre mesures : la FA est la mesure principalement utilisée, la MD qui évalue l'amplitude moyenne des mouvements de diffusion, la RD qui est corrélée à la démyélinisation et l'AD qui est inversement corrélé au dommage axonal.

La première remarque que nous pouvons faire c'est que la FA ne doit pas être prise en compte seule car comme nous l'avons vu avec l'étude 3 pour la patiente 011, la FA ne révèle aucun déficit. En revanche, si on s'intéresse aux autres mesures, on note une nette différence au niveau de la RD dans plusieurs régions, indiquant une démyélinisation par rapport aux contrôles, ainsi qu'une augmentation de la mesure de l'AD notamment dans le fasciculus uncinatus, impliqué dans la créativité (Wertz et al., 2020). Nous pensons que cette augmentation est la marque d'une

compensation par une repousse axonale qui renforce des tracts déjà existants et fonctionnels afin de pallier les déficits.

Par ailleurs, si l'on se base sur la littérature, l'interprétation de ces mesures reste complexe. En effet dans le cadre de patients en phase aigüe et subaigüe, les phénomènes inflammatoires viennent biaiser certains résultats : des variations de l'AD peuvent engendrer des variations de RD et vice versa (Winklewski et al., 2018). C'est pourquoi il reste difficile de clairement conclure sur l'impact d'une rééducation au niveau de la microstructure cérébrale dans ce cadre-là. En revanche dans une phase chronique on s'affranchit de ces phénomènes d'inflammation, nous permettant de conclure un peu plus facilement sur les mécanismes les plus probables qui peuvent sous-tendre les modifications cognitives. La littérature en phase chronique chez des patient TC reste assez peu documentée comparé à celle en phase aigüe et subaigüe, cependant elle s'accorde à dire qu'en phase chronique les patients TC présente une FA diminuée, et une MD, AD, RD augmentées dans certaines régions (Kraus et al., 2007). Il faut donc bien être attentif aux conclusions faites sur la base de ces mesures de diffusion, qui restent des mesures indirectes, il est important de garder en tête que ce ne sont que des interprétations.

Ainsi, lors de l'étude de la microstructure cérébrale, en phase aigüe et subaigüe il ne paraît pas nécessaire de mesurer les valeurs de l'AD et de la RD qui risquerait de flouter les informations importantes. En revanche dans le cas de patients en phase chronique, il est nécessaire d'étudier ces mesures qui sont plus sensibles aux anomalies. Or, en clinique seule une évaluation de la mesure de FA est faite ce qui comme c'était le cas de la patiente 011 biaise l'interprétation des plaintes cognitives et physique de la patiente. Nous préconisons donc une adaptation des examens IRM afin de les rendre plus pertinents aux déficits des patients en phase chronique.

V. Conclusion générale et perspectives

En conclusion générale de ce travail de thèse, nous pouvons dire que la créativité est un levier multidimensionnel essentiel pour un entraînement, car elle permet de potentialiser les effets de la rééducation proposée à des patients TC. Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier le potentiel de la créativité comme atout de remédiation dans d'autres pathologies associées à un déclin cognitif.

Nos travaux nous ont également permis de mettre en évidence qu'il y aurait un continuum dans la capacité d'introspection du sujet en parallèle d'une baisse de sa réserve cognitive. Le point de convergence de ces deux éléments constitue la « période charnière » favorable à l'acquisition de nouvelles habilités, pendant laquelle, d'une part le cerveau lésé présente encore une réserve cognitive suffisante, et d'autre part, le patient montre une gestion de son état suffisamment stable pour lui permettre d'intégrer de nouveaux éléments de contrôle. Cette période se trouve à moyenne distance du trauma, mais devra être précisée par de futurs travaux car elle est un point critique de la rééducation en phase chronique. La notion de personnalisation que nous avons pu voir dans la Partie 1 (Chapitre 2, II.), doit rester un facteur important pour espérer la réussite de tout projet de rééducation, puisqu'à la fois la réserve cognitive et la capacité d'introspection dépendent de l'individu. Ainsi cette période charnière est propre à chacun, il sera donc nécessaire de pouvoir clairement l'identifier pour chaque patient à travers des tests ou des questionnaires.

Bien sûr, ces conclusions s'appuient sur des études de cas et pour les confirmer il faudra agrandir l'échantillon de patients TC auquel notre prise en charge holistique sera proposée. De plus, afin de vérifier le concept de « niche créative » que je propose dans cette discussion, il faudra comparer un groupe de sujets aillant un entraînement ciblant uniquement les ressources à un second groupe auquel on proposera un entraînement ciblant à la fois les ressources et les conditions.

Pour finir, j'espère pouvoir affiner ma compréhension des données obtenues en particuliers chez les patients TC que j'ai suivi tout au long du programme d'entraînement. En effet, dans le cadre de mon stage postdoctoral, j'aurais la chance d'intégrer une équipe travaillant sur la fatigue et la vigilance. Chez les patients TC comme nous avons eu l'occasion de le voir avec le patient 012, la vigilance et la fatigue peuvent être un réel handicap qui limite leurs capacités cognitives. Grâce à ce stage postdoctoral j'aurais l'occasion d'étudier l'impact de différentes conditions telles que le stress ou la température sur les fonctions cognitives dans le cadre d'une privation de sommeil ou non. Or, une grande partie de ces patients présente des troubles du sommeil (Auxéméry, 2012). Ainsi, ces études nous aideront à mieux cerner l'impact de ces troubles du sommeil chez les patients TC.

ANNEXES

ANNEXE 1 : TESTS MNESIQUES

Comme nous l'avons vu dans la Partie 2, la mémoire peut être fortement impactée dans le cadre d'un traumatisme crânien. Dans cette première annexe, nous allons donc aborder les principaux tests neuropsychologiques développés afin d'évaluer différents types de mémoire et ainsi mettre en évidence de potentiels déficits. L'ensemble des tests mnésiques présentés dans cette annexe ont été utilisés pour le bilan de l'étude 3 (Partie 2, Chapitre 3).

Mémoire à court et long terme

Mémoire logique (MEM III)

Une première histoire (A) est lue et un rappel immédiat est demandé. Le sujet peut obtenir 25 points maximum s'il réussit à rappeler tous les éléments de l'histoire. De la même manière, une seconde histoire (B) est ensuite lue. L'histoire B est lue une seconde fois avec également un second rappel immédiat. 25 minutes plus tard, nous demandons un rappel de l'histoire A puis de l'histoire B. Enfin, nous posons 30 questions de reconnaissance. Les indices qui nous intéressent sont : la courbe d'apprentissage entre les deux rappels immédiats pour l'histoire B, le nombre de points total, le nombre de points obtenus à la reconnaissance et le pourcentage de rétention. (Wechsler, 2001)

Histoire logique MEM III								
Histoire A	Histoire B		Histoire A			Histoire B		
RI	RI 1	RI 2	RD	RD Ind	Recon	RD	RD Ind	Recon

Histoire logique I (RI A+RI1 B +RI2 B)	
Histoire logique II (RD A +RD B)	
% de rétention ((Histoire logique II/(RI A+RI 2 B))*100)	

Liste de mots (MEM III)

Nous lisons une liste de 12 mots au sujet quatre fois. A la fin de chaque lecture le sujet doit rappeler le plus de mots possibles de la liste. Ensuite, une seconde liste de 12 mots différents est lue une seule fois avec la même consigne, puis un rappel de la première liste est demandé (permet d'évaluer l'effet d'interférence). Un rappel différé est demandé après 25 min, ainsi qu'une reconnaissance. Nous nous intéressons au résultat obtenu à l'essai 1, la courbe d'apprentissage (différence entre essais 1 et 4), l'effet d'interférence, la reconnaissance et le pourcentage de rétention. *(Wechsler, 2001)*

Le RI 48

Dans une première étape d'encodage nous avons présenté au sujet quarante-huit mots usuels à mémoriser. Ces mots appartiennent à douze catégories sémantiques différentes (ex: armes, fruits,...). Il y a 12 feuilles présentées les unes après les autres au sujet, chaque feuille comporte quatre mots de catégories sémantiques différentes. La feuille est présentée au sujet jusqu'à trois fois le but étant d'obtenir un rappel immédiat indicé (RIM) de l'ensemble des mots de la feuille.

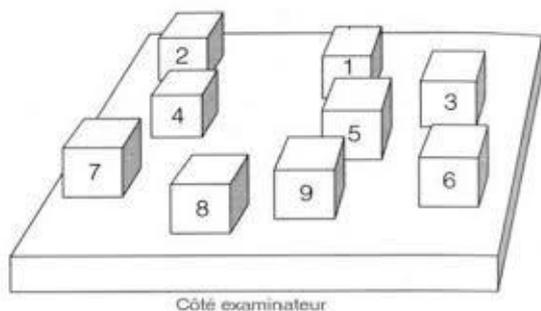
Dans une seconde étape nous avons demandé au participant un rappel Indicé différé par catégorie (RIND) pour chacune des douze catégories, le sujet disposait de 30 secondes par catégorie pour rappeler les 4 mots correspondants. Au terme du test nous obtenons un score RIND, qui correspond au nombre de mots que le sujet a correctement rappelé lors de la seconde phase. Nous nous intéressons aux RIM et RIND. *(Van der Linden et al., 2004)*

Empan mnésique numérique (WAIS IV)

Empan de chiffre endroit - L'examineur énonce une suite de 2 chiffres, puis 3 chiffres, 4 chiffres, etc. ... le sujet doit les répéter. Pour chaque niveau le sujet effectue deux essais avec deux suites différentes. Lorsque le sujet fait 2 erreurs pour un même niveau (par exemple une suite de 5 chiffres) l'exercice s'arrête et son empan chiffré correspond au nombre de chiffre de la suite précédente (4 dans notre exemple).

Empan de chiffre envers - L'exercice est ensuite réalisé dans l'ordre inverse ; le sujet répète les chiffres en partant du dernier chiffre énoncé par l'examineur. La notation reste la même que pour l'empan de chiffre endroit. Nous nous intéressons aux valeurs d'empan de la condition endroit et envers. (Wechsler, 2008)

Empan visuo-spatial : Cube de Corsi (WAIS IV)



Neuf petits cubes sont disposés aléatoirement sur un rectangle, du côté examinateur, les cubes sont numérotés de 1 à 9, alors que du côté du sujet, les cubes sont totalement vierges, il n'y a aucun moyen de les connaître leur numéro. L'exercice se déroule comme pour l'empan chiffré mais ici l'examineur montre avec

son doigt chaque cube dans l'ordre de la suite de chiffre qu'il est le seul à connaître. Nous nous intéressons également aux deux valeurs d'empan endroit et envers. (Wechsler, 2008)

Mémoire de travail

PASAT

Des chiffres sont énoncés à rythme régulier par l'ordinateur. Le but est de faire la somme du dernier chiffre entendu avec celui qui le précède. Il y a 60 calculs et nous travaillons avec le pourcentage de bonnes réponses. (Gronwall, 1977)

ANNEXE 2 : TESTS ATTENTIONNELS

Les capacités attentionnelles sont principalement évaluées grâce à la batterie de Tests d'évaluation de l'attention (TAP; Zimmermann and Fimm, 2007). C'est une batterie complète qui permet d'évaluer de nombreuses composantes attentionnelles. Dans cette annexe nous allons détailler les principales tâches utilisées dans le cadre de l'évaluation des déficits attentionnels chez les patients TC, ces tests ont été utilisés pour les bilans de l'étude 3 présentée dans la Partie 2, Chapitre 3.

TAP Attention soutenue



Des figures de formes, de couleurs et de tailles différentes apparaissent sur l'écran de l'ordinateur. Lorsque deux figures qui se succèdent sont de même forme ou de même couleur (indépendamment de leur taille et de la manière dont elles sont remplies), le sujet doit appuyer le plus rapidement possible sur la touche réponse. L'épreuve dure 15 minutes et nous nous intéressons au pourcentage moyen de bonnes réponses et aux temps de réponse calculés de 5 minutes en 5 minutes. Nous avons donc ces 6 valeurs d'intérêt ainsi que le pourcentage de bonnes réponses total.

TAP Alerte phasique

Le but est d'appuyer le plus rapidement possible sur la touche réponse lorsqu'une croix apparaît au centre de l'écran. Il y a quatre blocs de 20 essais, pour deux blocs il y a un bip qui précède l'apparition de la croix et pour les deux autres blocs il n'y a pas de bip de préparation. Les valeurs qui nous intéressent sont les temps de réactions moyens avec et sans avertisseur et le nombre de réponses anticipées.

Double tâche de Baddeley

Ce test est composé de deux tâches. Pour la première tâche, le sujet écoute puis répète une suite de chiffres de même longueur que son empan chiffré pendant 2 minutes. Le but est de répéter correctement le plus de suites de chiffres possibles. Pour la seconde tâche, le sujet est mis face à une feuille composée de nombreuses cases reliées entre elles. Le but est de faire des croix dans un maximum de cases en 2 minutes tout en suivant l'ordre des cases imposé par le trait les reliant. Ces deux tâches se font dans un premier temps en condition dite de « tâche simple », le sujet réalise les deux tâches l'une après l'autre. Puis le participant doit les faire en condition dite de « double tâche », le sujet fait les deux tâches en même temps, pendant 2 minutes. Dans ce test, c'est l'indice μ qui nous intéresse. (Baddeley et al., 1997)

$$\mu = (1 - (pm + pt)) * 100$$

Où : $pm = ps - pd$

$ps = (\text{nombre de séquences en simple}) / (\text{nombre de séquences correctes en simple})$

$pd = (\text{nombre de séquences en double}) / (\text{nombre de séquences correctes double})$

$pt = (\text{nombre box en simple} - \text{nombre box en double}) / \text{nombre box en simple}$

Double tâche Logiciel Memotechnik

Ce test se compose de deux tâches, une tâche de mémoire auditive et une tâche attentionnelle. Pour la première le sujet doit mémoriser un certain nombre de mots énoncés en fonction de son empan préalablement testé. Le but est de se souvenir d'un maximum de mots. Le délai entre chaque mot est d'une seconde et demie. Pour la seconde tâche, le sujet doit mémoriser une image cible puis il doit répondre le plus rapidement possible si oui ou non l'image qui lui est proposée par la suite est l'image cible. Ces deux tâches se font en simultanées et sont répétées 6 fois. Nous prenons en compte la moyenne sur les 6 essais du pourcentage de bonne réponse de la tâche attentionnelle et de la tâche de mémoire auditive ainsi que le temps de réponse moyen à la tâche attentionnelle.

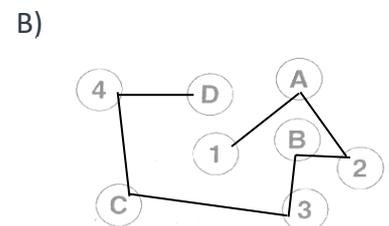
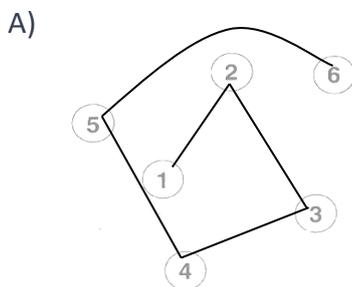
ANNEXE 3 : TESTS EXECUTIFS

Comme nous l'avons dit les patients TC se caractérisent par une atteinte frontale induisant un syndrome dysexécutif. Avant d'évaluer spécifiquement les fonctions exécutives de multiples tests ont été développés au cours des années. Nous allons lister les plus communément utilisés pour le bilan neuropsychologique chez les TC et dont nous nous sommes servis dans le cadre de l'étude 3.

Flexibilité mentale

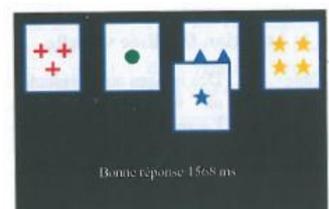
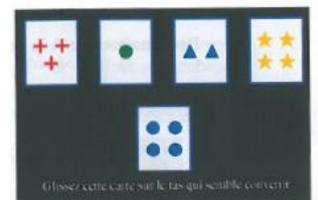
TMT

Le test se compose de deux exercices, un premier pour lequel le sujet doit relier le plus rapidement possible les chiffres dans l'ordre croissant (A). Et un second pour lequel il doit relier alternativement chiffres et lettres dans l'ordre croissant le plus rapidement possible (B). Nous nous intéressons au temps de réalisation et aux erreurs, uniquement pour la deuxième partie de cet exercice. (Zaloni et al., 2008)



Le Wisconsin Sorting Card Test

Ce test a été adapté de Heaton (1981) en version informatisée par l'IRBA. Le participant doit associer une carte présentée à l'une des quatre cartes de références. Cette association doit suivre une règle, soit la règle de la couleur, les 2 cartes ont la même couleur. Soit la règle des symboles, les deux cartes possèdent les mêmes symboles. Soit la règle du nombre de symboles sur les deux cartes. L'examineur ou l'ordinateur dans le cas de la version informatisée choisit une règle au hasard sans la communiquer au participant qui doit la



retrouver. Lorsque le participant associe deux cartes, l'examineur ou l'ordinateur lui dit si c'est juste ou faux. Si sa réponse est fautive il doit changer de règles jusqu'à trouver la bonne. Si sa réponse est juste il doit garder la règle. Au cours du test l'examineur ou l'ordinateur change 7 fois de règles. Nous nous intéressons au nombre de réponses correctes ainsi qu'au nombre d'erreurs persévérantes. (Heaton, 1981)

Inhibition

TAP No/NoGo

Pour cette tâche, soit une croix « x » apparaît au centre de l'écran, soit un « + ». Le sujet doit appuyer le plus rapidement possible sur la touche réponse seulement lorsque c'est la croix qui apparaît. Nous nous intéressons au temps de réaction moyen. (Zimmermann and Fimm, 2007)

Stroop



Ce test se décompose en trois tâches, une tâche de discrimination pendant laquelle le sujet doit nommer la couleur de chaque rectangle le plus rapidement possible.

vert rouge vert bleu
bleu vert rouge vert

Une tâche de lecture pendant laquelle le sujet doit le plus rapidement possible lire les mots présentés.

vert rouge bleu vert
rouge vert vert bleu

Et la troisième tâche est une tâche d'interférence pour laquelle le sujet doit énoncer la couleur de l'ancre dans laquelle le mot est écrit le plus rapidement possible.

Dans cet exercice, ce qui nous intéresse c'est le temps total de dénomination, de lecture et d'interférence ainsi que l'indice d'interférence. (Golden and Freshwater, 1978)

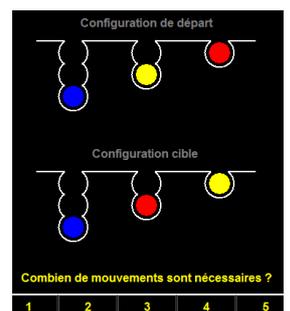
Simon formes

Nous utilisons une tâche de Simon informatisée par l'IRBA. Dans ce test un rond s'affiche aléatoirement à gauche ou à droite d'une croix centrale sur l'écran. Il faut appuyer sur la touche « Q » du clavier, donc à gauche, si le rond est orange et sur la touche M, à droite, si le rond est bleu. Si par exemple le rond est bleu et à droite de l'écran, la réponse est dite « compatible » car le côté où se situe le rond correspond au côté de la touche réponse. Dans le cas contraire, la réponse est dite « incompatible », le sujet doit inhiber la réponse automatique du côté ipsilatéral. Nous nous intéressons au nombre d'erreurs compatibles et incompatibles. (Craft and Simon, 1970; Simon and Rudell, 1967)

Planification

Tour de Londres

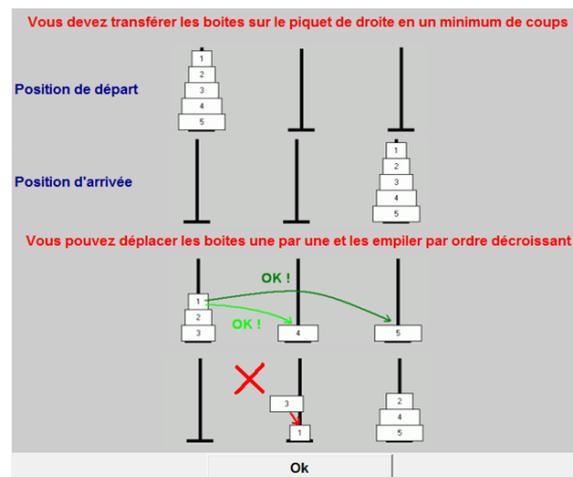
Pour ce test, le sujet doit estimer, en planifiant mentalement ses mouvements, le nombre nécessaire pour passer d'une configuration de départ à une configuration finale. Sachant qu'il ne peut déplacer qu'une bille à la fois et seulement celle sur le haut du puit. Il y a trois puits qui peuvent accueillir un nombre différent de billes (1, 2 et 3). Ce test a été



adapté en version informatisé par l'IRBA dont est tiré l'image ci-contre. Le dessin supérieur est la configuration de départ et le dessin inférieur est celle d'arrivée. Le participant à pour consigne d'être le plus rapide possible en faisant un minimum d'erreur. La valeur qui nous intéresse ici est l'indice d'efficacité, c'est le temps divisé par le pourcentage de bonnes réponses. (Shallice, 1982)

Tour de Hanoi

Nous avons utilisé une version informatisée et adaptée de ce test par l'IRBA. Dans cette version le sujet fait face à trois piques, sur celle de droite sont imbriqués des rectangles de taille croissante. Le participant doit le plus rapidement possible et en un minimum de coups possible, déplacer les rectangles et reformer la pyramide sur la pique de droite. Pour cela le sujet n'a le droit de déplacer qu'un rectangle à la fois, celui du haut de la pile, et il ne peut pas poser un rectangle sur un plus petit. Ce test se décompose en cinq niveaux, pour le premier le sujet n'a qu'un seul rectangle à déplacer, puis deux etc... jusqu'à arriver à cinq rectangles à déplacer. Les valeurs qui nous intéressent ici sont le temps ainsi que le nombre de coups nécessaire pour réussir le niveau. (Simon, 1975)



Le test des 6 éléments

Ce test est un exercice de planification, il est composé de 3 épreuves, chacune d'elle séparée en deux parties A et B. Pour la première épreuve le sujet doit écrire l'itinéraire pour aller de chez lui au lieu du test pour la version A et dans le sens inverse pour la version B. La seconde tâche est une tâche de dénomination, il doit écrire le nom des images contenues dans 2 piles A et B. Chaque pile contient 50 images. La dernière épreuve consiste à résoudre des calculs simples. Il y a deux feuilles de calculs A et B de 50 calculs chacune.

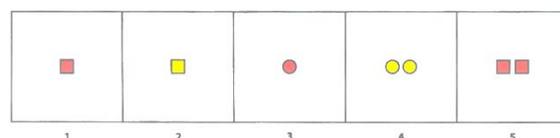
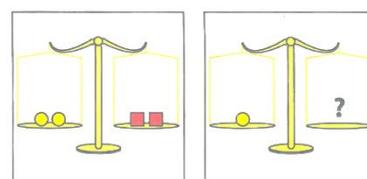
Pour réaliser ces tâches le sujet doit respecter 4 règles : 1) Il dispose de 15 minutes pour réaliser l'ensemble des tâches et un chronomètre est mis à sa disposition. 2) Les 6 tâches ont la même valeur. 3) Pour les images et les calculs, les 15 premiers items bénéficient d'un bonus de points. 4) Il ne doit pas réaliser deux tâches A et B de même nature l'une à la suite de l'autre.

La mission du sujet est de comptabiliser un maximum de points en respectant les 4 règles. Pour que le participant obtienne un score maximal de 1110 points il doit planifier l'ordre dans lequel il effectue les exercices. Le score de point et le score d'erreur (pour chaque manquement à l'une des quatre règles) sont nos valeurs d'intérêts. (Chevignard et al., 2008)

Raisonnement

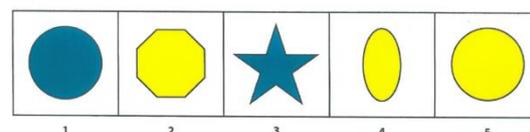
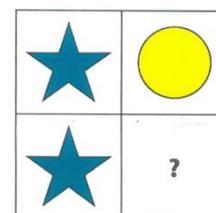
Balances (WAIS IV)

Le but de cet exercice est d'équilibrer la balance de droite par rapport aux déductions que l'on peut tirer de la ou des balance(s) de gauche(s). Il n'y a qu'une seule bonne réponse parmi les 5 proposées. L'exercice se complique au fur et à mesure des 27 items. C'est la note obtenue sur 27 qui nous intéresse. (Wechsler, 2008)



Matrices (WAIS IV)

Le but de cet exercice est de compléter la matrice. Il n'y a qu'une seule bonne réponse parmi les 5 proposées. L'exercice se complique au fur et à mesure des 26 items. C'est la note obtenue sur 26 qui nous intéresse. (Wechsler, 2008)



Problèmes de Luria

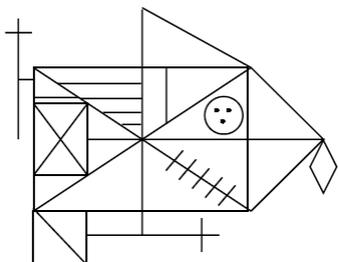
Il s'agit de sept problèmes mathématiques simples, par exemple : « Un fils a 5 ans, dans 15 ans, son père sera 3 fois plus âgé que lui. Quel âge a le père aujourd'hui ? » (Réponse : 45 ans) Chaque bonne réponse rapporte 1 point, nous nous intéressons au pourcentage total de bonnes réponses. (Luria et al., 1967)

Fluence

Il s'agit du test de fluence de Cardebat, le participant doit lister un maximum de mot en deux minutes qui doivent soit commencer par la lettre « p » pour l'évaluation de la fluence sémantique, soit des mots appartenant à la catégorie des noms d'animaux pour la fluence catégorielle. Pour ces deux cas, le sujet doit suivre certaines règles, il ne doit pas se répéter, il ne doit pas dire de mots de la même famille et pour la fluence sémantique, il ne doit pas énoncer de nom propre. Nous nous intéressons au nombre de bonnes réponses dans chacune des deux catégories. (Cardebat et al., 1990)

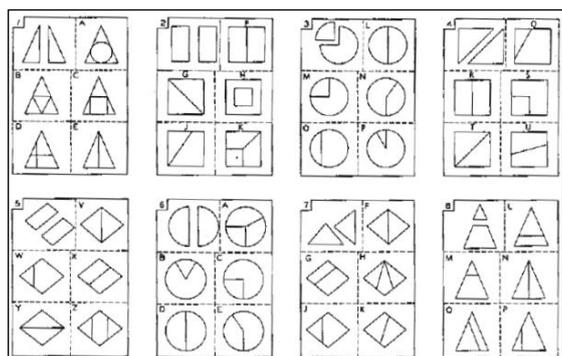
Capacités visuo-spatiales / -constructives

La figure de Rey



Grâce à ce test nous pouvons à la fois mettre en évidence des déficits praxites, et évaluer la mémoire visuo-spatiale à long terme des participants. Dans un premier temps, on demande au sujet de copier la figure. Dans un second temps, après 25 minutes, il doit la reproduire de mémoire. Pour la copie et le rappel nous notons l'ordre d'exécution. La figure est ensuite notée selon une grille de cotation établie. Nous nous intéressons au nombre de points obtenu lors du rappel de la figure après 25 minutes ainsi que l'ordre d'exécution pour la copie et le rappel. (Fastenau et al., 1999)

Le Minnesota



Ce test est présenté sous forme papier, il permet d'évaluer les capacités visuo-constructives des participants. 64 items sont présentés au sujet, pour chaque item, une figure plane morcelée (composée de plusieurs formes géométriques) est proposée comme modèle (en haut à gauche). Le

participant doit retrouver parmi cinq figures reconstituées celle qui correspond au modèle morcelé. Dans cet exercice les différentes pièces sont bien délimitées, aussi bien dans l'éclatement initial que dans la forme finale. Le test a recours à des figures en noir et blanc. La durée standard et normée de ce test est de 20 minutes et le participant doit compléter un maximum des 64 items du test. Nous nous intéressons à la note du sujet qui correspond au nombre de bonnes réponses auquel on soustrait 1/5 des mauvaises réponses. (*Feliciano et al., 2011*)

ANNEXE 4 : TESTS DEVELOPPES AU LABORATOIRE ET IMAGES AMBIGÜES

Comme nous en avons fait mention dans la Partie 2, Chapitre 1, il existe des phénomènes de compensation qui mettent à contribution les fonctions préservées pour pallier les déficits. Cette compensation peut contribuer à masquer les difficultés des patients jusqu'à une certaine mesure. Il est donc important de développer des tests plus adaptés pour les patients en phase chronique qui seront capables d'appréhender les déficiences cognitives dans un contexte complexe d'interaction des processus cognitifs. Dans cette optique, nous avons développé deux tests qui pourraient permettre de mettre en évidence un déficit de fonctionnement complexe et/ou d'autres types de déficits non évalués en routine

AFVS

Ce test est divisé en 4 sous-tests, pour l'ensemble des sous-tests le sujet doit dans un premier temps mémoriser une image cible.

Image cible



Pour le sous-test 1 une image apparaît aléatoirement à droite ou à gauche de l'écran, le sujet doit appuyer sur la « touche entrée » si c'est l'image cible, sinon sur la « barre espace ». Ce sous-test a principalement été développé pour des patients atteints de la maladie d'Alzheimer (Alescio-Lautier et al., 2019) et évalue la flexibilité

Exemple sous-test 1



attentionnelle. Cependant, dans le cas de patient TC en phase chronique il est trop simple et n'a donc pas été utilisé.

Pour les sous-tests 2 et 3 le sujet doit focaliser son attention sur l'image qui se trouve sous la flèche verte. Le sous-test 2 rend compte de l'attention visuo-spatiale focalisée. Au sous-test 3 la flèche disparaît à certains moments, le sujet doit alors se rappeler de son dernier emplacement pour répondre, ce qui rajoute un élément de mémoire de travail.

Exemple sous-tests 2 et 3



Le sous-test 4 est le plus compliqué de ces sous-tests, après le premier essai, une étoile rouge remplace la flèche. Elle indique le côté où le sujet doit porter son attention pour répondre à l'essai suivant, ce qui introduit une notion de planification et d'anticipation.

Exemple sous-test 4



Pour ce test nous nous intéressons à la valeur du Temps de Réponse divisée par le % BR. Cet indice est appelé « l'Inverse Efficiency Score » (IES).

Réaliser un nœud

Ce test comprend deux niveaux, un simple et un complexe, différenciés par le nombre d'étapes à retenir. Pour les deux niveaux, le sujet est face à l'écran et visualise une vidéo qui met en scène, à la première personne, un individu exécutant un nœud d'une façon bien précise. Le sujet a pour consigne de bien regarder la vidéo sans mimer les gestes, et de mémoriser les étapes de réalisation du nœud. La vidéo lui est présentée une première fois en vitesse normale puis une seconde fois au ralenti.

Images issues de la vidéo



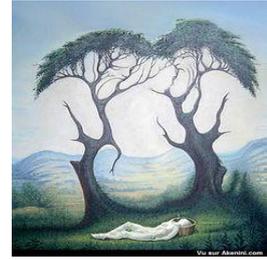
Ensuite on demande au sujet de reproduire ces étapes, il doit faire bien attention car lorsqu'il effectue un mouvement il ne peut pas revenir en arrière. De cette façon le sujet ne peut pas retrouver la procédure en essai erreur et le résultat obtenu est bien le fruit de sa mémoire. Pour finir on demande au sujet de décrire les étapes de réalisation sans mimer. Nous pensons que le premier rappel moteur permettra au patient de renforcer l'encodage avec une seconde modalité ce qui facilitera le rappel verbal par la suite.

Pour chaque rappel, nous comptons le nombre d'étapes réalisées ou décrites et le transformons en pourcentage.

Images Ambigües

L'entraînement que nous avons mis au point a pour but d'améliorer la créativité des patients afin de favoriser leur résilience. Dans ce cadre nous avons voulu avoir un indice de leur capacité de sortie de cadre à un niveau perceptif. Pour cela nous avons utilisé des images ambiguës, que nous présentons une par une au patient. Il dispose de 30 secondes

Exemple d'image ambiguë



pour décrire l'image à partir du moment où celle-ci lui est révélée. Aucune information supplémentaire ne lui est fournie hormis de décrire tout ce qu'il peut voir sur l'image.

Pour ce test nous comptabilisons, pour chacune des 4 images présentées, le nombre d'items vu en plus de l'image principale.

Exemple de feuille de cotation pour les nœuds

Expérimentateur :

Date :

Code sujet :

Nœud sans lâcher les bouts

Etape	Faire	Décrire
1		
2		
3		
4		
5		

Remarque :

Sac de nœuds

Etape	Faire	Décrire
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

Remarque :

Exemple de feuille de cotation pour les images ambiguës

Code sujet :

Date :

Bilan :

Image 1

Description :

Vus : Femme de dos, 2 Vieillards

Image 2

Description :

Vus : Vieil homme, Jeune homme sur cheval, Rivière, Pont, Homme couché

Image 3

Description :

Vus visage (5):

Vus animaux : Chat, Lapins*2, Chien, oiseau

Vu pilier (2) :

Image 4

Description :

Vus : Lapin, Canard

Annexe 5 : Groupes Contrôles

Attention Focalisée Visuo-Spatiale

		Sous-test 2							
		TR moy (s)		TR total (s)		%BR		IES (TR moy)	
	N	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
19-29 ans	58	0,82	0,13	65,49	10,47	99,05	1,41	0,0083	0,0013
30-39 ans	22	0,88	0,15	70,50	12,37	99,55	0,73	0,0088	0,0015
40-49 ans	27	1,09	0,29	87,16	23,17	99,26	1,11	0,0110	0,0030
50-59 ans	26	1,00	0,19	79,71	15,47	98,37	3,64	0,0101	0,0020
60-69 ans	26	1,16	0,25	92,53	20,17	99,23	1,37	0,0117	0,0025
70-87 ans	17	1,59	0,49	127,04	39,34	97,13	4,44	0,0165	0,0055
		Sous-test 3							
		TR moy (s)		TR total (s)		%BR		IES (TR moy)	
	N	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
19-29 ans	57	1,03	0,19	82,75	14,80	98,53	1,66	0,0105	0,0019
30-39 ans	21	1,26	0,29	100,99	23,47	96,85	6,47	0,0131	0,0031
40-49 ans	27	1,49	0,30	119,57	23,92	96,67	4,59	0,0155	0,0034
50-59 ans	26	1,55	0,40	124,14	32,00	92,93	7,83	0,0170	0,0053
60-69 ans	26	1,73	0,41	138,07	32,54	91,11	12,87	0,0193	0,0051
70-87 ans	16	2,27	0,98	181,97	78,46	89,53	7,80	0,0257	0,0112
		Sous-test 4							
		TR moy (s)		TR total (s)		%BR		IES (TR moy)	
	N	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
19-29 ans	58	1,37	0,32	109,61	25,21	96,62	5,28	0,0142	0,0034
30-39 ans	22	1,67	0,41	133,83	33,15	94,26	6,25	0,0178	0,0045
40-49 ans	28	1,90	0,49	152,18	38,85	90,94	7,24	0,0211	0,0059
50-59 ans	26	1,96	0,50	157,08	40,09	88,03	10,16	0,0226	0,0063
60-69 ans	27	2,22	0,53	177,85	42,65	81,57	10,80	0,0276	0,0071
70-87 ans	17	3,20	1,28	256,05	103,26	82,73	8,82	0,0391	0,0162

Images Ambigües

Version 1 Bilan Pré-entraînement			
	N	Moy % BR	Ecart type % BR
19-29 ans	37	21,62	26,62
30-39 ans	15	28,48	31,42
40-50 ans	15	25,45	33,79
Version 2 Bilan Pré-entraînement			
	N	Moy % BR	Ecart type % BR
19-29 ans	16	14,87	17,30
30-39 ans	12	16,38	19,23
40-50 ans	14	17,24	11,32

Mémoire sensori-motrice : les Nœuds

Version 1 Pré entraînement

Nœud simple

N		Nœud Réussi	Etapes réussies (/5)	% BR Faire	Etapes décrites (/5)	% BR Décrire	
19-29 ans	31	Moyenne	0,90	4,45	89,03	4,65	92,90
		Ecart type	0,30	0,96	19,21	0,88	17,55
30-39 ans	15	Moyenne	0,83	4,42	88,33	4,67	93,33
		Ecart type	0,39	1,00	19,92	0,89	17,75
40-50 ans	14	Moyenne	0,93	4,86	97,14	4,57	91,43
		Ecart type	0,27	0,36	7,26	0,51	10,27

Noeud complexe

N		Nœud Réussi	Etapes réussies (/12)	% BR Faire	Etapes décrites (/12)	% BR Décrire	
19-29 ans	31	Moyenne	0,32	9,23	76,88	9,16	76,34
		Ecart type	0,48	2,20	18,35	2,00	16,68
30-39 ans	15	Moyenne	0,08	8,58	71,53	7,75	64,58
		Ecart type	0,29	2,84	23,69	2,63	21,94
40-50 ans	14	Moyenne	0,14	9,00	75,00	9,57	79,76
		Ecart type	0,36	1,30	10,84	1,34	11,19

Version 2 Post entraînement

Nœud simple

N		Nœud Réussi	Etapes réussies (/5)	% BR Faire	Etapes décrites (/5)	% BR Décrire	
19-29 ans	16	Moyenne	0,69	3,75	75,00	4,13	82,50
		Ecart type	0,48	1,34	26,83	1,15	22,95
30-39 ans	13	Moyenne	0,38	2,92	58,46	3,31	66,15
		Ecart type	0,51	1,44	28,82	1,55	30,97
40-50 ans	14	Moyenne	0,71	3,50	70,00	4,14	82,86
		Ecart type	0,47	1,40	28,01	1,17	23,35

Noeud complexe

N		Nœud Réussi	Etapes réussies (/12)	% BR Faire	Etapes décrites (/12)	% BR Décrire	
19-29 ans	16	Moyenne	0,13	5,69	51,70	8,73	79,39
		Ecart type	0,34	3,59	32,65	2,15	19,58
30-39 ans	13	Moyenne	0,08	4,08	35,68	6,23	56,64
		Ecart type	0,28	2,72	26,34	3,35	30,41
40-50 ans	14	Moyenne	0,07	4,07	37,01	7,29	66,23
		Ecart type	0,27	2,87	26,07	3,15	28,62

Wisconsin (version informatisée par l'IRBA)

	N	nb catégorie		nb réponse correcte		nb erreur persévérante	
		Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
19-29 ans	37	5,87	0,39	70,65	10,27	9,32	5,13
30-39 ans	15	5,23	1,61	74,73	14,64	11,13	8,85
40-50 ans	15	5,96	0,09	70,07	6,94	9,67	3,52

Simon Forme

			Compatible				Incompatible			
	N		% BR	TR	% erreur	TR erreur	% BR	TR	% erreur	TR erreur
19-29 ans	37	Moyenne	95,43	453,46	3,62	294,78	93,19	396,19	5,65	237,81
		Ecart type	3,43	73,56	3,17	207,97	4,94	128,14	4,84	155,06
30-39 ans	15	Moyenne	94,98	479,32	4,61	288,76	94,31	490,81	4,89	342,57
		Ecart type	5,75	83,20	5,74	247,27	4,70	77,48	4,69	208,84
40-50 ans	15	Moyenne	96,51	455,93	2,75	252,13	92,98	461,00	5,82	273,13
		Ecart type	3,21	113,84	2,67	206,84	3,18	137,13	3,56	98,54

Tour de Londres

		N	IES 1	IES 2	IES 3	IES 4	IES 5
19-29 ans	37	Moyenne	47,31	68,83	91,81	154,10	248,06
		Ecart-type	13,16	20,78	25,67	47,27	96,36
30-39 ans	15	Moyenne	77,42	84,90	119,38	179,62	225,48
		Ecart-type	85,48	75,02	77,14	90,50	119,27
40-50 ans	15	Moyenne	52,94	78,03	107,99	174,48	277,24
		Ecart-type	14,39	24,92	45,82	64,51	146,24

Tour d'Hanoi

		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4		Niveau 5		Total		
	N	TR (s)	Nb coups	TR (s)	Nb coups	TR (s)	Nb coups	TR (s)	Nb coups	TR (s)	Nb coups	
19-29 ans	16	Moyenne	8,06	3,00	37,81	9,75	93,13	28,63	219,31	76,06	363,06	118,44
		Ecart-type	1,44	0,00	29,89	3,26	47,75	14,05	159,59	52,93	180,23	56,89
30-39 ans	18	Moyenne	9,72	3,11	28,17	8,39	91,39	29,33	228,50	60,28	363,61	102,17
		Ecart-type	5,19	0,47	18,41	2,25	72,87	19,95	139,02	22,08	193,31	34,35
40-50 ans	15	Moyenne	12,27	3,40	34,20	9,40	135,93	35,53	334,07	91,87	523,40	141,20
		Ecart-type	9,95	1,06	14,49	2,61	90,73	21,71	268,43	66,00	346,16	82,16

Résolution de problèmes

Version 1

	N	% BR	Ecart type
19-29 ans	37	46,28	26,16
30-39 ans	15	43,33	25,82
40-50 ans	15	53,33	24,76

Version 2

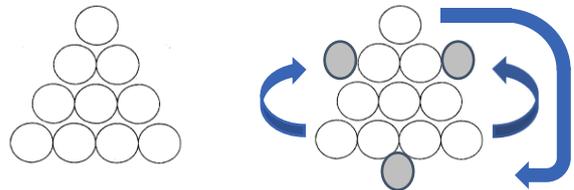
	N	% BR	Ecart type
18-29 ans	16	47,66	22,92
30-39 ans	12	42,71	20,96
40-50 ans	14	43,75	21,79

ANNEXE 6 : RESOLUTION DE PROBLEMES

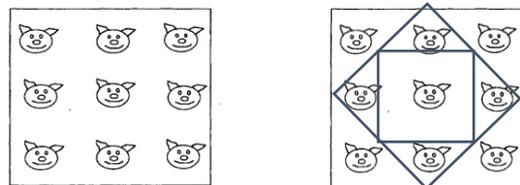
Pour chacun des bilans pré- et post- entraînement nous avons proposés deux problèmes visuo-spatiaux et six hypothético-déductifs. Au bout de 4 minutes nous évaluons la performance du sujet puis nous lui laissons tout le temps qu'il souhaite pour terminer. Ces problèmes sont tirés de Schooler et collaborateurs (1993). Nous nous intéressons au %BR total pour ces deux catégories de problèmes. Voici, ci-après, ceux utilisés pour le bilan pré-entraînement, nous avons utilisés une deuxième version pour le bilan post-entraînement.

Problèmes visuo-spatiaux

« Montrez comment vous pourriez faire pour que le triangle pointe vers le bas en ne mobilisant que trois cercles. »



« Neuf cochons sont présents au sein de cet enclos carré. Dessiner deux nouveaux carrés permettant que chaque cochon soit dans son propre enclos »



Problèmes hypothético-déductifs

« Un vendeur de pièces antiques a reçu l'offre d'acheter une magnifique pièce en bronze. Cette pièce possédait une tête d'empereur sur une face et sur son autre face la date estampillée 544 av J.-C. Le vendeur a examiné la pièce mais au lieu de l'acheter, il a appelé la police. Pourquoi ? »

Réponse : C'est une fausse, elle ne peut pas être estampillée 544 AVANT Jésus Christ.

« Sur un lac, la surface recouverte par des nénuphars double toutes les 24 heures. Au début de l'été, il y a seulement un nénuphar sur le lac. Cela prend 60 jours pour que le lac soit entièrement recouvert par des nénuphars. Quel jour sera-t-il recouvert à moitié »

Réponse : le 59^{ème} jours puisqu'il double chaque 24h.

« Il y a quatre pièces, deux pièces plus lourdes de poids égal, deux pièces plus légères de poids égal. Toutes sont indifférenciables en apparence ou au toucher. (Vous ne pouvez pas les prendre à part pour les regarder ou les porter). Comment pouvez-vous dire quelles sont les pièces lourdes et quelles sont les pièces légères en deux pesées sur une balance ? (Vous ne pouvez utiliser la balance que deux fois) ».

Réponse : Il faut une balance à poids, disposer une pièce sur chacun des plateaux de la balance. Si la balance est à l'équilibre alors les deux pièces sont de même poids, retirer l'une ou l'autre des pièces. Peser la troisième, si elle est plus lourde cela signifie que les 2 premières étaient les légères et que les deux autres sont les plus lourdes. Si au départ les deux pièces ne sont pas de même poids, alors de la même façon il suffit d'en remplacer une par une autre pour pouvoir déduire le poids de la dernière.

« Trois cartes d'un jeu ordinaire sont posées sur une table, à la gauche d'une reine, il y a un valet. A la gauche du pique il y a un carreau. A la droite du cœur il y a un roi. A la droite du roi il y a du pique. Pouvez-vous donner la suite correcte de chaque image de ces trois cartes ? »

Réponse : Valet de cœur, roi de carreau et dame de pique. Le valet n'est pas immédiatement à gauche de la reine.

« La police est convaincue que A, B, C ou D a commis un crime. Chacun des suspects à son tour effectue une déclaration mais une seule est vraie.

-A dit « Je ne l'ai pas fait »

-B dit « A ment »

-C dit « B ment »

-D dit « B l'a fait »

Qui dit la vérité ? Qui a commis le crime ? »

Réponse : B dit la vérité et A l'a fait.

« Marie ne mange ni poisson ni épinard, Sally ne mange ni poisson, ni haricot vert, Steve ne mange ni crevette ni pomme de terre, Alice ne mange ni bœuf ni tomate, et Jim ne mange ni poisson ni tomate. Si vous aviez la volonté d'inviter à dîner l'ensemble de ces convives difficiles, quels items de la liste suivante choisiriez-vous : haricot vert, céleri, morue à la crème, rôti de bœuf, poulet rôti et salade ? »

Réponse : céleri, poulet rôti et salade.

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, A., 2018. *The neuroscience of creativity*. Cambridge University Press.
- Abraham, A., Thybusch, K., Pieritz, K., Hermann, C., 2014. Gender differences in creative thinking: behavioral and fMRI findings. *Brain Imaging Behav.* 8, 39–51. <https://doi.org/10.1007/s11682-013-9241-4>
- Agnoli, S., Zanon, M., Mastria, S., Avenanti, A., Corazza, G.E., 2018. Enhancing creative cognition with a rapid right-parietal neurofeedback procedure. *Neuropsychologia* 118, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.02.015>
- Alescio-Lautier, B., Herrera, C., Paban, V., 2012. Quel rôle attribuer à l'entraînement cognitif dans la prévention du vieillissement et dans la diminution du risque de démence ?, in: *Les Démences Au Croisement Des Non-Savoirs, Chemins de La Complexité, Psychologie & Vieillesse*. pp. 167–179.
- Alescio-Lautier, B., Sambucchi, N., Michel, B.-F., Chambon, C., 2019. Multifactorial Cognitive Training can Slow Down the Cognitive Decline in Early Alzheimer Patients. *J. Alzheimers Dis. Park.* 9, 8.
- Althuizen, N., Reichel, A., 2016. The Effects of IT-Enabled Cognitive Stimulation Tools on Creative Problem Solving: A Dual Pathway to Creativity. *J. Manag. Inf. Syst.* 33, 11–44. <https://doi.org/10.1080/07421222.2016.1172439>
- Amabile, T.M., 2013. Componential Theory of Creativity. *Encycl. Manag. Theory* 10.
- Amabile, T.M., 1988. A model of creativity and innovation in organizations. *Res. Organ. Behav.* 10, 123–167.
- Amabile, T.M., 1983. The Social Psychology of Creativity: A Componential Conceptualization. *J. Pers. Soc. Psychol.* 45, 357–376.
- Amabile, T.M., Goldfarb, P., Brackfield, S.C., 1990. Social influences on creativity: Evaluation, coaction, and surveillance. *Creat. Res. J.* 3, 6–21. <https://doi.org/10.1080/10400419009534330>
- Andrews-Hanna, J.R., Smallwood, J., Spreng, R.N., 2014. The default network and self-generated thought: component processes, dynamic control, and clinical relevance: The brain's default network. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1316, 29–52. <https://doi.org/10.1111/nyas.12360>
- Ansburg, P.I., Hill, K., 2003. Creative and analytic thinkers differ in their use of attentional resources. *Personal. Individ. Differ.* 34, 1141–1152. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00104-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00104-6)
- Arkin, C., Przysinda, E., Pfeifer, C.W., Zeng, T., Loui, P., 2019. Gray Matter Correlates of Creativity in Musical Improvisation. *Front. Hum. Neurosci.* 13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00169>
- Artola, A., von Frijtag, J.C., Fermont, P.C.J., Gispen, W.H., Schrama, L.H., Kamal, A., Spruijt, B.M., 2006. Long-lasting modulation of the induction of LTD and LTP in rat hippocampal CA1 by behavioural stress and environmental enrichment. *Eur. J. Neurosci.* 23, 261–272. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04552.x>
- Ashby, F.G., Isen, A.M., 1999. A Neuropsychological Theory of Positive Affect and Its Influence on Cognition. *Psychol. Rev.* 106, 529–550.
- Auxéméry, Y., 2012. Traumatisme crânien léger et syndrome post-commotionnel : un questionnaire ré-émergent. *L'Encéphale* 38, 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2011.07.003>
- Azouvi, P., Arnould, A., Dromer, E., Vallat-Azouvi, C., 2017. Neuropsychology of traumatic brain injury: An expert overview. *Rev. Neurol. (Paris)* 173, 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2017.07.006>
- Azouvi, P., Couillet, J., Leclercq, M., Martin, Y., Asloun, S., Rousseaux, M., 2004. Divided attention and mental effort after severe Traumatic Brain Injury. *Neuropsychologia* 42, 1260–1268.

- Baas, M., De Dreu, C.K.W., Nijstad, B.A., 2008. A meta-analysis of 25 years of mood-creativity research: Hedonic tone, activation, or regulatory focus? *Psychol. Bull.* 134, 779–806. <https://doi.org/10.1037/a0012815>
- Baddeley, A., Della Sala, S., 1996. Working memory and executive control. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1397–1404.
- Baddeley, A., Della Sala, S., Papagno, C., Spinnler, H., 1997. Dual-task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology* 11, 187–194. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.11.2.187>
- Baddeley, A.D., 2000. The phonological loop and the irrelevant speech effect: Some comments on Neath (2000). *Psychon. Bull. Rev.* 7, 544–549. <https://doi.org/10.3758/BF03214369>
- Baird, B., Smallwood, J., Mrazek, M.D., Kam, J.W.Y., Franklin, M.S., Schooler, J.W., 2012. Inspired by Distraction: Mind Wandering Facilitates Creative Incubation. *Psychol. Sci.* 23, 1117–1122. <https://doi.org/10.1177/0956797612446024>
- Barbey, A.K., Colom, R., Grafman, J., 2013. Architecture of cognitive flexibility revealed by lesion mapping. *NeuroImage* 82, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.087>
- Beaty, R.E., Benedek, M., Barry Kaufman, S., Silvia, P.J., 2015. Default and Executive Network Coupling Supports Creative Idea Production. *Sci. Rep.* 5, 10964. <https://doi.org/10.1038/srep10964>
- Beaty, R.E., Benedek, M., Wilkins, R.W., Jauk, E., Fink, A., Silvia, P.J., Hodges, D.A., Koschutnig, K., Neubauer, A.C., 2014. Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia* 64, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.09.019>
- Beaty, R.E., Chen, Q., Christensen, A.P., Qiu, J., Silvia, P.J., Schacter, D.L., 2018. Brain networks of the imaginative mind: Dynamic functional connectivity of default and cognitive control networks relates to openness to experience. *Hum. Brain Mapp.* 39, 811–821. <https://doi.org/10.1002/hbm.23884>
- Beaty, R.E., Christensen, A.P., Benedek, M., Silvia, P.J., Schacter, D.L., 2017. Creative constraints: Brain activity and network dynamics underlying semantic interference during idea production. *NeuroImage* 148, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.01.012>
- Beaty, R.E., Seli, P., Schacter, D.L., 2019. Network neuroscience of creative cognition: mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.013>
- Benedek, M., Beaty, R., Jauk, E., Koschutnig, K., Fink, A., Silvia, P.J., Dunst, B., Neubauer, A.C., 2014a. Creating metaphors: The neural basis of figurative language production. *NeuroImage* 90, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.046>
- Benedek, M., Jauk, E., Beaty, R.E., Fink, A., Koschutnig, K., Neubauer, A.C., 2016. Brain mechanisms associated with internally directed attention and self-generated thought. *Sci. Rep.* 6, 22959. <https://doi.org/10.1038/srep22959>
- Benedek, M., Jauk, E., Sommer, M., Arendasy, M., Neubauer, A.C., 2014b. Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity. *Intelligence* 46, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.05.007>
- Benedek, M., Neubauer, A.C., 2013. Revisiting Mednick's Model on Creativity-Related Differences in Associative Hierarchies. Evidence for a Common Path to Uncommon Thought. *J. Creat. Behav.* 47, 273–289. <https://doi.org/10.1002/jocb.35>
- Bernier, R.A., Hillary, F.G., 2019. Traumatic brain injury and frontal lobe plasticity. *Handb. Clin. Neurol.* 163, 411–431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804281-6.00022-7>
- Binder, J.C., Martin, M., Zöllig, J., Röcke, C., Mérillat, S., Eschen, A., Jäncke, L., Shing, Y.L., 2016. Multi-domain training enhances attentional control. *Psychol. Aging* 31, 390–408. <https://doi.org/10.1037/pag0000081>

- Binder, J.C., Zöllig, J., Eschen, A., Mérillat, S., Röcke, C., Schoch, S.F., Jäncke, L., Martin, M., 2015. Multi-domain training in healthy old age: Hotel Plastisse as an iPad-based serious game to systematically compare multi-domain and single-domain training. *Front. Aging Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00137>
- Birdi, K., 2016. Creativity training, in: *Human Resource Management, Innovation and Performance*. Palgrave Macmillan UK, London. <https://doi.org/10.1057/9781137465191>
- Birdi, K., Leach, D., Magadley, W., 2012. Evaluating the impact of TRIZ creativity training: an organizational field study: TRIZ training evaluation. *RD Manag.* 42, 315–326. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2012.00686.x>
- Boden, M.A., 1998. Creativity and artificial intelligence. *Artif. Intell.* 103, 347–356.
- Bonnardel, N., 2006. *Créativité et conception, approches cognitives et ergonomiques*. Groupe de Boeck.
- Bonnardel, N., 2000. Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cognitive environment. *Knowl.-Based Syst.* 13, 505–513.
- Bonnardel, N., Didier, J., 2020. Brainstorming variants to favor creative design. *Appl. Ergon.* 83, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102987>
- Bott, N., Quintin, E.-M., Saggarr, M., Kienitz, E., Royalty, A., Hong, D.W.-C., Liu, N., Chien, Y., Hawthorne, G., Reiss, A.L., 2014. Creativity training enhances goal-directed attention and information processing. *Think. Ski. Creat.* 13, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2014.03.005>
- Boynton, T., 2001. Applied Research Using Alpha/Theta Training for Enhancing Creativity and Well-Being. *J. Neurother.* 5, 5–18. https://doi.org/10.1300/J184v05n01_02
- Buitenweg, J.I.V., van de Ven, R., Prinssen, S., Murre, J.M.J., Ridderinkhof, K.R., 2017. Cognitive flexibility training: A large-scale multimodal adaptive active-control intervention study in healthy older adults. *Front. Hum. Neurosci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00529>
- Camacho, L.M., Paulus, P.B., 1995. The role of social anxiousness in group brainstorming. *J. Pers. Soc. Psychol.* 68, 1071–1080. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.68.6.1071>
- Canal, C.E., 2018. Serotonergic Psychedelics: Experimental Approaches for Assessing Mechanisms of Action. *Handb. Exp. Pharmacol.* 252, 227–260. https://doi.org/10.1007/164_2018_107
- Cardebat, D., Doyon, B., Puel, M., Goulet, P., Joannette, Y., 1990. Formal and semantic lexical evocation in normal subjects. Performance and dynamics of production as a function of sex, age and educational level. *Act Neurol Belg.* 90, 207–217.
- Carrasco-Poyatos, M., Rubio-Arias, J.A., Ballesta-García, I., Ramos-Campo, D.J., 2019. Pilates vs. muscular training in older women. Effects in functional factors and the cognitive interaction: A randomized controlled trial. *Physiol. Behav.* 201, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.12.008>
- Cattelani, R., Zettin, M., Zoccolotti, P., 2010. Rehabilitation Treatments for Adults with Behavioral and Psychosocial Disorders Following Acquired Brain Injury: A Systematic Review. *Neuropsychol. Rev.* 20, 52–85. <https://doi.org/10.1007/s11065-009-9125-y>
- Cavanna, A.E., Trimble, M.R., 2006. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain* 129, 564–583. <https://doi.org/10.1093/brain/awl004>
- Chambon, C., Alescio-Lautier, B., 2019. Improved executive functioning in healthy older adults after multifactorial cognitive training targeting controlled processes. *J. Syst. Integr. Neurosci.* <https://doi.org/10.15761/JSIN.1000218>
- Chambon, C., Herrera, C., Romaguere, P., Paban, V., Alescio-Lautier, B., 2014. Benefits of computer-based memory and attention training in healthy older adults. *Psychol. Aging* 29, 731–743. <https://doi.org/10.1037/a0037477>
- Chen, Q.-L., Xu, T., Yang, W.-J., Li, Y.-D., Sun, J.-Z., Wang, K.-C., Beaty, R.E., Zhang, Q.-L., Zuo, X.-N., Qiu, J., 2015. Individual differences in verbal creative thinking are reflected in the precuneus. *Neuropsychologia* 75, 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.001>

- Chevignard, M., Taillefer, C., Picq, C., Pradat-Diehl, P., 2008. Évaluation écologique des fonctions exécutives chez un patient traumatisé crânien. *Ann. Réadapt. Médecine Phys.* 51, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2007.10.008>
- Chi, R.P., Snyder, A.W., 2011. Facilitate Insight by Non-Invasive Brain Stimulation. *PLoS ONE* 6, e16655. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016655>
- Christensen, H., Anstey, K.J., Leach, L.S., Mackinnon, A.J., 2008. Intelligence, education, and the brain reserve hypothesis, in: *The Handbook of Aging and Cognition*, 3rd Ed. Psychology Press, New York, NY, US, pp. 133–188.
- Chu, Y., MacGregor, J.N., 2011. Human Performance on Insight Problem Solving: A Review. *J. Probl. Solving* 3. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1094>
- Cicerone, K.D., Langenbahn, D.M., Braden, C., Malec, J.F., Kalmar, K., Fraas, M., Felicetti, T., Laatsch, L., Harley, J.P., Bergquist, T., Azulay, J., Cantor, J., Ashman, T., 2011. Evidence-Based Cognitive Rehabilitation: Updated Review of the Literature From 2003 Through 2008. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 92, 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2010.11.015>
- Clapham, M.M., 2003. The Development of Innovative Ideas Through Creativity Training, in: *The International Handbook on Innovation*. Elsevier, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1016/B978-008044198-6/50025-5>
- Cole, M.W., Schneider, W., 2007. The cognitive control network: Integrated cortical regions with dissociable functions. *NeuroImage* 37, 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.071>
- Colzato, L.S., de Haan, A.M., Hommel, B., 2015. Food for creativity: tyrosine promotes deep thinking. *Psychol. Res.* 79, 709–714. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0610-4>
- Colzato, L.S., Ozturk, A., Hommel, B., 2012. Meditate to create: the impact of focused-attention and open monitoring training on convergent and divergent thinking. *Front. Psychol.* 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00116>
- Connelly, J.B., Chell, S., Tennant, A., Rigby, A.S., Airey, C.M., 2006. Modelling 5-year functional outcome in a major traumatic injury survivor cohort. *Disabil. Rehabil.* 28, 629–636. <https://doi.org/10.1080/09638280500276513>
- Costa, P.T., McCrae, R.R., Kay, G.G., 1995. Persons, Places, and Personality: Career Assessment Using the Revised NEO Personality Inventory. *J. Career Assess.* 3, 123–139. <https://doi.org/10.1177/106907279500300202>
- Couillet, J., Soury, S., Lebornec, G., Asloun, S., Joseph, P.-A., Mazaux, J.-M., Azouvi, P., 2010. Rehabilitation of divided attention after severe traumatic brain injury: a randomised trial. *Neuropsychol. Rehabil.* 20, 321–339. <https://doi.org/10.1080/09602010903467746>
- Cousijn, J., Koolschijn, P.C.M.P., Zanolie, K., Kleibeuker, S.W., Crone, E.A., 2014a. The Relation between Gray Matter Morphology and Divergent Thinking in Adolescents and Young Adults. *PLoS ONE* 9, e114619. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114619>
- Cousijn, J., Zanolie, K., Munsters, R.J.M., Kleibeuker, S.W., Crone, E.A., 2014b. The Relation between Resting State Connectivity and Creativity in Adolescents before and after Training. *PLoS ONE* 9, e105780. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105780>
- Cox, C.M., 1926. *The early mental traits of three hundred geniuses*. Stanford University Press.
- Craft, J.L., Simon, J.R., 1970. Processing symbolic information from a visual display: interference from an irrelevant directional cue. *J. Exp. Psychol.* 83, 415.
- Cramond, B., 1995. The coincidence of Attention Deficit Hyperactivity Disorder and creativity.
- Cropley, D.H., 2015. Creativity Training, in: *Creativity in Engineering*. Elsevier, pp. 227–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800225-4.00009-4>
- Csikszentmihalyi, M., 1990. *The domain of creativity*.
- Cunha, M.P. e, Clegg, S.R., Mendonça, S., 2010. On serendipity and organizing. *Eur. Manag. J.* 28, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2010.07.001>

- De Dreu, C.K.W., Baas, M., Nijstad, B.A., 2008. Hedonic tone and activation level in the mood-creativity link: Toward a dual pathway to creativity model. *J. Pers. Soc. Psychol.* 94, 739–756. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.94.5.739>
- de Montleau, F., Lapeyre, É., 2013. Après la blessure. Les acteurs et les outils de la réinsertion. *Inflexions* N° 23, 93. <https://doi.org/10.3917/infle.023.0093>
- Deepak, K.K., 2019. Meditation induces physical relaxation and enhances cognition: A perplexing paradox. *Prog. Brain Res., Progress in Brain Research* 244, 85–99. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.030>
- DeFina, P., Fellus, J., Polito, M.Z., Thompson, J.W.G., Moser, R.S., DeLuca, J., 2009. The new neuroscience frontier: promoting neuroplasticity and brain repair in traumatic brain injury. *Clin. Neuropsychol.* 23, 1391–1399. <https://doi.org/10.1080/13854040903058978>
- Denervaud, S., Knebel, J.-F., Hagmann, P., Gentaz, E., 2019. Beyond executive functions, creativity skills benefit academic outcomes: Insights from Montessori education. *PLOS ONE* 14, e0225319. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225319>
- Dennis, M., Yeates, K.O., Taylor, H.G., Fletcher, J.M., 2007. Brain reserve capacity, cognitive reserve capacity, and age-based functional plasticity after congenital and acquired brain injury in children, in: *Cognitive Reserve: Theory and Applications*. Taylor & Francis, Philadelphia, PA, US, pp. 53–83.
- DePalma, R.G., 2015. Combat TBI: History, Epidemiology, and Injury Modes, in: Kobeissy, F.H. (Ed.), *Brain Neurotrauma: Molecular, Neuropsychological, and Rehabilitation Aspects*, *Frontiers in Neuroengineering*. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton (FL).
- Diehl, M., Stroebe, W., 1987. Productivity loss in brainstorming groups: Toward the solution of a riddle. *J. Pers. Soc. Psychol.* 53, 497–509. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.53.3.497>
- Dimkov, P.R., 2018. The Genius of Creativity and the Creativity of Genius: The Neuro-Dynamics of Creativity in Karl Jaspers and Sigmund Freud. *J. Genius Eminence* 3, 83–92. <https://doi.org/10.18536/jge.2018.04.3.1.07>
- Ding, X., Tang, Y.-Y., Cao, C., Deng, Y., Wang, Y., Xin, X., Posner, M.I., 2015a. Short-term meditation modulates brain activity of insight evoked with solution cue. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 10, 43–49. <https://doi.org/10.1093/scan/nsu032>
- Ding, X., Tang, Y.-Y., Deng, Y., Tang, R., Posner, M.I., 2015b. Mood and personality predict improvement in creativity due to meditation training. *Learn. Individ. Differ.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.lindif.2014.11.019>
- Ding, X., Tang, Y.-Y., Tang, R., Posner, M.I., 2014. Improving creativity performance by short-term meditation. *Behav. Brain Funct.* 10. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-10-9>
- Dow, G.T., Mayer, R.E., 2004. Teaching Students to Solve Insight Problems: Evidence for Domain Specificity in Creativity Training. *Creat. Res. J.* 15.
- Draper, K., Ponsford, J., 2008. Cognitive functioning ten years following traumatic brain injury and rehabilitation. *Neuropsychology* 22, 618–625. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.5.618>
- Drevdahl, J.E., Cattell, R.B., 1958. Personality and creativity in artists and writers. *J. Clin. Psychol.*
- Elmasry, J., Loo, C., Martin, D., 2015. A systematic review of transcranial electrical stimulation combined with cognitive training. *Restor. Neurol. Neurosci.* 33, 263–278. <https://doi.org/10.3233/RNN-140473>
- Engle, Randall 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: Miyake, A., Shah, P. (Eds.), *Models of Working Memory*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 102–134. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.007>
- Engle, Randall W., Laughlin, J.E., Tuholski, S.W., Conway, A.R.A., 1999. Working Memory, Short-Term Memory, and General Fluid Intelligence: A Latent-Variable Approach 23. <http://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.128.3.309>

- Erickson, K.I., Colcombe, S.J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M.S., Scalf, P.E., Kim, J.S., Alvarado, M., Kramer, A.F., 2007. Training-Induced Functional Activation Changes in Dual-Task Processing: An fMRI Study. *Cereb. Cortex* 17, 192–204. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj137>
- Fastenau, P.S., Denburg, N.L., Hufford, B.J., 1999. Adult norms for the Rey-Osterrieth Complex Figure Test and for supplemental recognition and matching trials from the Extended Complex Figure Test. *Clin. Neuropsychol.* 13, 30–47.
- Feist, G.J., 2019. Creativity and the Big Two model of personality: plasticity and stability. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27, 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.07.005>
- Feliciano, L., Baker, J.C., Anderson, S.L., LeBlanc, L.A., Orchanian, D.M., 2011. Concurrent Validity of the Cognitive Assessment of Minnesota in Older Adults with and without Depressive Symptoms. *J. Aging Res.* 2011, 1–6. <https://doi.org/10.4061/2011/853624>
- Ferrari, A., Cachia, R., Punie, Y., 2009. Innovation and Creativity in Education and Training in the EU Member States: Fostering Creative Learning and Supporting Innovative Teaching. Literature review on Innovation and Creativity in E&T in the EU Member States (ICEAC). JRC Tech. Notes 65.
- Ferrer, M.-H., 2013. Créativité adaptative et résilience : recherche de leviers favorisant l'adaptation et la réadaptation dans le domaine de la santé. Aix-Marseille Université.
- Fink, A., Benedek, M., Koschutnig, K., Papousek, I., Weiss, E.M., Bagga, D., Schöpf, V., 2018. Modulation of resting-state network connectivity by verbal divergent thinking training. *Brain Cogn.* 128, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.10.008>
- Fink, A., Benedek, M., Koschutnig, K., Pirker, E., Berger, E., Meister, S., Neubauer, A.C., Papousek, I., Weiss, E.M., 2015. Training of verbal creativity modulates brain activity in regions associated with language- and memory-related demands: Training of Verbal Creativity. *Hum. Brain Mapp.* 36, 4104–4115. <https://doi.org/10.1002/hbm.22901>
- Fink, A., Grabner, R.H., Gebauer, D., Reishofer, G., Koschutnig, K., Ebner, F., 2010. Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: Evidence from an fMRI study. *NeuroImage* 52, 1687–1695. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.072>
- Finke, R.A., 1996. Imagery, Creativity, and Emergent Structure. *Conscious. Cogn.* 5, 381–393. <https://doi.org/10.1006/ccog.1996.0024>
- Finke, R.A., Ward, T.B., Smith, S.M., 1992. Creative cognition: Theory, research, and applications.
- Fox, K.C., Beaty, R.E., 2019. Mind-wandering as creative thinking: neural, psychological, and theoretical considerations. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.10.009>
- Fredrickson, B.L., 1998. What Good Are Positive Emotions? *Rev. Gen. Psychol.* 2, 300–319. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.300>
- Frith, E., Loprinzi, P.D., 2018. Experimental effects of acute exercise and music listening on cognitive creativity. *Physiol. Behav.* 191, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.03.034>
- Gable, S.L., Hopper, E.A., Schooler, J.W., 2019. When the Muses Strike: Creative Ideas of Physicists and Writers Routinely Occur During Mind Wandering. *Psychol. Sci.* 30, 396–404. <https://doi.org/10.1177/0956797618820626>
- Gates, N.J., Rutjes, A.W., Di Nisio, M., Karim, S., Chong, L.-Y., March, E., Martínez, G., Vernooij, R.W., 2019. Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in late life. *Cochrane Database Syst. Rev.* 3. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012277.pub2>
- Ghiselin, B., 1985. *The creative process : Reflections on the invention in the arts and sciences*, University of California Press. ed.
- Glasø de Lange, A.-M., Sjøli Brathen, A.C., Rohani, D.A., Grydeland, H., Fjell, A.M., Walhovd, K.B., 2017. The effects of memory training on behavioural and microstructural plasticity in young and older adults. *Hum. Brain Mapp.* 38, 5666–5680. <https://doi.org/10.1002/hbm.23756>

- Gocłowska, M.A., Ritter, S.M., Elliot, A.J., Baas, M., 2018. Novelty seeking is linked to openness and extraversion, and can lead to greater creative performance. *J. Pers.* 87, 252–266. <https://doi.org/10.1111/jopy.12387>
- Godwin, C.A., Hunter, M.A., Bezdek, M.A., Lieberman, G., Elkin-Frankston, S., Romero, V.L., Witkiewitz, K., Clark, V.P., Schumacher, E.H., 2017. Functional connectivity within and between intrinsic brain networks correlates with trait mind wandering. *Neuropsychologia* 103, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.07.006>
- Goff, K., Torrance, E.P., 2002. Abbreviated Torrance Test for Adults. Scholastic Testing Service. Bensenville Illinois 60106–1617.
- Golden, C.J., Freshwater, S.M., 1978. Stroop color and word test.
- Gong, Z., Shan, C., Yu, H., 2019. The relationship between the feedback environment and creativity: a self-motives perspective. *Psychol. Res. Behav. Manag.* Volume 12, 825–837. <https://doi.org/10.2147/PRBM.S221670>
- Gronwall, D.M.A., 1977. Paced Auditory Serial-Addition Task: A Measure of Recovery from Concussion. *Percept. Mot. Skills* 44, 367–373. <https://doi.org/10.2466/pms.1977.44.2.367>
- Gruzelier, J., 2009. A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cogn. Process.* 10, 101–109. <https://doi.org/10.1007/s10339-008-0248-5>
- Gruzelier, J.H., 2014. EEG-neurofeedback for optimising performance. II: Creativity, the performing arts and ecological validity. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 44, 142–158. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.11.004>
- Gruzelier, J.H., Thompson, T., Redding, E., Brandt, R., Steffert, T., 2014. Application of alpha/theta neurofeedback and heart rate variability training to young contemporary dancers: State anxiety and creativity. *Int. J. Psychophysiol.* 93, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.05.004>
- Guilford, J.P., 1968. Intelligence, creativity, and their educational implications. Edits Pub.
- Guilford, J.P., 1950. Creativity. *Am. Psychol.* 5, 444–454. <https://doi.org/10.1037/h0063487>
- Gupta, N., Jang, Y., Mednick, S.C., Huber, D.E., 2012. The Road Not Taken: Creative Solutions Require Avoidance of High-Frequency Responses. *Psychol. Sci.* 23, 288–294. <https://doi.org/10.1177/0956797611429710>
- Güss, C.D., Tuason, Ma.T., Gerhard, C., 2009. Cross-National Comparisons of Complex Problem-Solving Strategies in Two Microworlds. *Cogn. Sci.* 34, 489–520. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2009.01087.x>
- Hahm, J., Kim, K.K., Park, S.-H., 2019. Cortical correlates of creative thinking assessed by the figural Torrance Test of Creative Thinking: *NeuroReport* 30, 1289–1293. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000001358>
- Haller, C.S., Bosma, C.M., Kapur, K., Zafonte, R., Langer, E.J., 2017. Mindful creativity matters: trajectories of reported functioning after severe traumatic brain injury as a function of mindful creativity in patients' relatives: a multilevel analysis. *Qual. Life Res.* 26, 893–902. <https://doi.org/10.1007/s11136-016-1416-1>
- Hao, N., Yuan, H., Cheng, R., Wang, Q., Runco, M.A., 2015. Interaction effect of response medium and working memory capacity on creative idea generation. *Front. Psychol.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01582>
- Hardy, J.L., Nelson, R.A., Thomason, M.E., Sternberg, D.A., Katovich, K., Farzin, F., Scanlon, M., 2015. Enhancing Cognitive Abilities with Comprehensive Training: A Large, Online, Randomized, Active-Controlled Trial. *PloS One* 10, e0134467. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134467>
- Hare, E., 1987. Creativity and mental illness. *Br. Med. J. Clin. Res.* Ed 295, 1587.
- Heaton, R.K., 1981. Wisconsin card sorting test manual. *Psychol. Assess. Resour.*

- Hempel, A., Giesel, F.L., Garcia Caraballo, N.M., Amann, M., Meyer, H., Wüstenberg, T., Essig, M., Schröder, J., 2004. Plasticity of cortical activation related to working memory during training. *Am. J. Psychiatry* 161, 745–747.
- Hermida, Y., Clem, W., Güss, C.D., 2019. The Inseparable Three: How Organization and Culture Can Foster Individual Creativity. *Front. Psychol.* 10, 2133. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02133>
- Herrera, C., Chambon, C., Michel, B.F., Paban, V., Alescio-Lautier, B., 2012. Positive effects of computer-based cognitive training in adults with mild cognitive impairment. *Neuropsychologia* 50, 1871–1881. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.04.012>
- Holt, R.D., 2009. Bringing the Hutchinsonian niche into the 21st century: Ecological and evolutionary perspectives. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 19659–19665. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905137106>
- Hommel, B., Colzato, L.S., Fischer, R., Christoffels, I.K., 2011. Bilingualism and Creativity: Benefits in Convergent Thinking Come with Losses in Divergent Thinking. *Front. Psychol.* 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00273>
- Huang, F., Tang, S., Sun, P., Luo, J., 2018. Neural correlates of novelty and appropriateness processing in externally induced constraint relaxation. *NeuroImage* 172, 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.070>
- Hübener, M., Bonhoeffer, T., 2014. Neuronal plasticity: beyond the critical period. *Cell* 159, 727–737. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.035>
- Hussey, E.K., Novick, J.M., 2012. The Benefits of Executive Control Training and the Implications for Language Processing. *Front. Psychol.* 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00158>
- Ivancovsky, T., Kurman, J., Morio, H., Shamay-Tsoory, S., 2019. Transcranial direct current stimulation (tDCS) targeting the left inferior frontal gyrus: Effects on creativity across cultures. *Soc. Neurosci.* 14, 277–285. <https://doi.org/10.1080/17470919.2018.1464505>
- Jauk, E., Neubauer, A.C., Dunst, B., Fink, A., Benedek, M., 2015. Gray matter correlates of creative potential: A latent variable voxel-based morphometry study. *Neuroimage* 111, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.02.002>
- John, O.P., Donahue, E.M., Kentle, R.L., 1991. The big five inventory—versions 4a and 54. Berkeley, CA: University of California, Berkeley, Institute of Personality ...
- Johnson, V.E., Stewart, W., Smith, D.H., 2013. Axonal pathology in traumatic brain injury. *Exp. Neurol.* 246, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.01.013>
- Jolles, D.D., Grol, M.J., Van Buchem, M.A., Rombouts, S.A., Crone, E.A., 2010. Practice effects in the brain: changes in cerebral activation after working memory practice depend on task demands. *Neuroimage* 52, 658–668.
- Jourdan, C., Bayen, E., Pradat-Diehl, P., Ghout, I., Darnoux, E., Azerad, S., Vallat-Azouvi, C., Charanton, J., Aegerter, P., Ruet, A., Azouvi, P., 2016. A comprehensive picture of 4-year outcome of severe brain injuries. Results from the Paris-TBI study. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 59, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.10.009>
- Jung, R.E., 2013. The structure of creative cognition in the human brain. *Front. Hum. Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00330>
- Jung, R.E., Segall, J.M., Jeremy Bockholt, H., Flores, R.A., Smith, S.M., Chavez, R.S., Haier, R.J., 2009. Neuroanatomy of creativity. *Hum. Brain Mapp.* 31, 398–409. <https://doi.org/10.1002/hbm.20874>
- Kandler, C., Riemann, R., Angleitner, A., Spinath, F.M., Borkenau, P., Penke, L., 2016. The nature of creativity: The roles of genetic factors, personality traits, cognitive abilities, and environmental sources. *J. Pers. Soc. Psychol.* 111, 230–249. <https://doi.org/10.1037/pspp0000087>
- Kane, M.J., Engle, R.W., 2002. The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychon. Bull. Rev.* 9, 637–671. <https://doi.org/10.3758/BF03196323>

- Katz, D.I., Cohen, S.I., Alexander, M.P., 2015. Mild traumatic brain injury, in: *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier, pp. 131–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52892-6.00009-X>
- Kharkhurin, A.V., 2011. The Role of Selective Attention in Bilingual Creativity. *Creat. Res. J.* 23, 239–254. <https://doi.org/10.1080/10400419.2011.595979>
- Kienitz, E., Quintin, E.-M., Saggar, M., Bott, N.T., Royalty, A., Hong, D.W.-C., Liu, N., Chien, Y., Hawthorne, G., Reiss, A.L., 2014. Targeted intervention to increase creative capacity and performance: A randomized controlled pilot study. *Think. Ski. Creat.* 13, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2014.03.002>
- Kinnunen, K.M., Greenwood, R., Powell, J.H., Leech, R., Hawkins, P.C., Bonnelle, V., Patel, M.C., Counsell, S.J., Sharp, D.J., 2011. White matter damage and cognitive impairment after traumatic brain injury. *Brain* 134, 449–463. <https://doi.org/10.1093/brain/awq347>
- Knoll, L.J., Fuhrmann, D., Sakhardande, A.L., Stamp, F., Speekenbrink, M., Blakemore, S.-J., 2016. A Window of Opportunity for Cognitive Training in Adolescence. *Psychol. Sci.* 27, 1620–1631. <https://doi.org/10.1177/0956797616671327>
- Kozhevnikov, Maria, Kozhevnikov, Michael, Yu, C.J., Blazhenkova, O., 2013. Creativity, visualization abilities, and visual cognitive style. *Br. J. Educ. Psychol.* 83, 196–209. <https://doi.org/10.1111/bjep.12013>
- Kraus, M.F., Susmaras, T., Caughlin, B.P., Walker, C.J., Sweeney, J.A., Little, D.M., 2007. White matter integrity and cognition in chronic traumatic brain injury: a diffusion tensor imaging study. *Brain* 130, 2508–2519. <https://doi.org/10.1093/brain/awm216>
- Kraus, N., Chandrasekaran, B., 2010. Music training for the development of auditory skills. *Nat. Rev. Neurosci.* 11, 599–605. <https://doi.org/10.1038/nrn2882>
- Kuypers, K.P.C., 2018. Out of the box: A psychedelic model to study the creative mind. *Med. Hypotheses* 115, 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2018.03.010>
- Lambert, T.J., Fernandez, S.M., Frick, K.M., 2005. Different types of environmental enrichment have discrepant effects on spatial memory and synaptophysin levels in female mice. *Neurobiol. Learn. Mem.* 83, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.12.001>
- Lawrence, B.J., Gasson, N., Bucks, R.S., Troeung, L., Loftus, A.M., 2017. Cognitive Training and Noninvasive Brain Stimulation for Cognition in Parkinson’s Disease: A Meta-analysis. *Neurorehabil. Neural Repair* 31, 597–608. <https://doi.org/10.1177/1545968317712468>
- LeBoutillier, N., Marks, D.F., 2003. Mental imagery and creativity: A meta-analytic review study. *Br. J. Psychol.* 94, 29–44. <https://doi.org/10.1348/000712603762842084>
- Li, W., Li, X., Huang, L., Kong, X., Yang, W., Wei, D., Li, J., Cheng, H., Zhang, Q., Qiu, J., Liu, J., 2015. Brain structure links trait creativity to openness to experience. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 10, 191–198. <https://doi.org/10.1093/scan/nsu041>
- Limb, C.J., Braun, A.R., 2008. Neural Substrates of Spontaneous Musical Performance: An fMRI Study of Jazz Improvisation. *PLoS ONE* 3, e1679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001679>
- Lin, C., Wang, M., 1994. The creativity assessment packet. Taipei Taiwan Psychol. Publ.
- Liu, H.-Y., Wang, I.-T., Chen, N.-H., Chao, C.-Y., 2020. Effect of creativity training on teaching for creativity for nursing faculty in Taiwan: A quasi-experimental study. *Nurse Educ. Today* 85, 104231. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2019.104231>
- Lombroso, C., 1895. *The man of genius*, Charles Scribner’s Sons. ed, The contemporary Science Series. New-York.
- López-Giménez, J.F., González-Maeso, J., 2018. Hallucinogens and Serotonin 5-HT_{2A} Receptor-Mediated Signaling Pathways. *Curr. Top. Behav. Neurosci.* 36, 45–73. https://doi.org/10.1007/7854_2017_478
- Loprinzi, P.D., Herod, S.M., Cardinal, B.J., Noakes, T.D., 2013. Physical activity and the brain: A review of this dynamic, bi-directional relationship. *Brain Res.* 1539, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.10.004>
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., Zenasni, F., 2015. *Psychologie de la créativité-2e édition*. Armand Colin.

- Lubart, T.I., Mouchiroud, C., Tordjman, S., Zenasni, F., 2003. *Psychologie de la créativité* (2e édition augmentée). Paris: Armand Colin.
- Luria, A.R., Tsvetkova, L., L'Hermitte, R., 1967. *Les troubles de la resolution de problemes: Analyse neuropsychologique*. Gauthier-Villars.
- Mackinnon, D.W., 1962. The nature and nurture of creative talent. *Am. Psychol.* 17, 484–495. <https://doi.org/10.1037/h0046541>
- Maclin, E.L., Mathewson, K.E., Low, K.A., Boot, W.R., Kramer, A.F., Fabiani, M., Gratton, G., 2011. Learning to multitask: effects of video game practice on electrophysiological indices of attention and resource allocation. *Psychophysiology* 48, 1173–1183.
- Madore, K.P., Addis, D.R., Schacter, D.L., 2015. Creativity and Memory: Effects of an Episodic-Specificity Induction on Divergent Thinking. *Psychol. Sci.* 26, 1461–1468. <https://doi.org/10.1177/0956797615591863>
- Marquez de la Plata, C.D., Yang, F.G., Wang, J.Y., Krishnan, K., Bakhadirov, K., Paliotta, C., Aslan, S., Devous, M.D., Moore, C., Harper, C., McColl, R., Munro Cullum, C., Diaz-Arrastia, R., 2011. Diffusion Tensor Imaging Biomarkers for Traumatic Axonal Injury: Analysis of Three Analytic Methods. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 17, 24–35. <https://doi.org/10.1017/S1355617710001189>
- Marron, T.R., Lerner, Y., Berant, E., Kinreich, S., Shapira-Lichter, I., Hendler, T., Faust, M., 2018. Chain free association, creativity, and the default mode network. *Neuropsychologia* 118, 40–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.018>
- Martindale, C., 2007. Creativity, primordial cognition, and personality. *Personal. Individ. Differ.* 43, 1777–1785. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2007.05.014>
- Mathé, J.-F., Richard, I., Rome, J., 2005. Santé publique et traumatismes crâniens graves. Aspects épidémiologiques et financiers, structures et filières de soins. *Ann. Fr. Anesth. Réanimation* 24, 688–694. <https://doi.org/10.1016/j.annfar.2005.03.029>
- Mayseless, N., Eran, A., Shamay-Tsoory, S.G., 2015. Generating original ideas: The neural underpinning of originality. *NeuroImage* 116, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.030>
- Mazaux, J.-M., Masson, F., Levin, H.S., Alaoui, P., Maurette, P., Barat, M., 1997. Long-term neuropsychological outcome and loss of social autonomy after traumatic brain injury. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 78, 1316–1320. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90303-8](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90303-8)
- McVay, J.C., Kane, M.J., Kwapil, T.R., 2009. Tracking the train of thought from the laboratory into everyday life: An experience-sampling study of mind wandering across controlled and ecological contexts. *Psychon. Bull. Rev.* 16, 857–863. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.5.857>
- Mechelli, A., 2004. Where Bottom-up Meets Top-down: Neuronal Interactions during Perception and Imagery. *Cereb. Cortex* 14, 1256–1265. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh087>
- Mednick, S., 1962. The associative basis of the creative process. *Psychol. Rev.* 69, 220–232. <https://doi.org/10.1037/h0048850>
- Memmert, D., 2007. Can Creativity Be Improved by an Attention-Broadening Training Program? An Exploratory Study Focusing on Team Sports. *Creat. Res. J.* 19, 281–291. <https://doi.org/10.1080/10400410701397420>
- Mendelsohn, G.A., 1976. Associative and attentional processes in creative performance1. *J. Pers.* 44, 341–369. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1976.tb00127.x>
- Miller, G.F., Tal, I.R., 2007. Schizotypy versus openness and intelligence as predictors of creativity. *Schizophr. Res.* 93, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2007.02.007>
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A., Wager, T.D., 2000. The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognit. Psychol.* 41, 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

- Mozolic, Hayasaka, Laurienti, 2010. A cognitive training intervention increases resting cerebral blood flow in healthy older adults. *Front. Hum. Neurosci.* 4, 10. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.016.2010>
- Mumford, M.D., Gustafson, S.B., 1988. Creativity syndrome: Integration, application, and innovation. *Psychol. Bull.* 103, 27.
- Nęcka, E., Żak, P., Gruszka, A., 2016. Insightful Imagery is Related to Working Memory Updating. *Front. Psychol.* 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00137>
- Neubauer, A.C., Martskvishvili, K., 2018. Creativity and intelligence: A link to different levels of human needs hierarchy? *Heliyon* 4, e00623. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00623>
- Nyberg, L., 2005. Cognitive training in healthy aging. *Cogn. Neurosci. Aging Link. Cogn. Cereb. Aging* 309–321.
- Oddy, M., Moir, J.F., Fortescue, D., Chadwick, S., 2012. The prevalence of traumatic brain injury in the homeless community in a UK city. *Brain Inj.* 26, 1058–1064. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.667595>
- Ogawa, T., Aihara, T., Shimokawa, T., Yamashita, O., 2018. Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses. *Sci. Rep.* 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24981-0>
- Olesen, P.J., Westerberg, H., Klingberg, T., 2004. Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nat. Neurosci.* 7, 75–79.
- Onarheim, B., Friis-Olivarius, M., 2013. Applying the neuroscience of creativity to creativity training. *Front. Hum. Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00656>
- Osborn, A.F., 1957. *Applied Imagination*, revised edition. Scribner N. Y. NY.
- Paban, V., Chambon, C., Manrique, C., Touzet, C., Alescio-Lautier, B., 2011. Neurotrophic signaling molecules associated with cholinergic damage in young and aged rats: environmental enrichment as potential therapeutic agent. *Neurobiol. Aging* 32, 470–485.
- Paban, V., Jaffard, M., Chambon, C., Malafosse, M., Alescio-Lautier, B., 2005. Time course of behavioral changes following basal forebrain cholinergic damage in rats: Environmental enrichment as a therapeutic intervention. *Neuroscience* 132, 13–32. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2004.11.024>
- Paulus, P.B., Dzindolet, M.T., 1993. Social influence processes in group brainstorming. *J. Pers. Soc. Psychol.* 64, 575–586. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.64.4.575>
- Penadés, R., Pujol, N., Catalán, R., Massana, G., Rametti, G., García-Rizo, C., Bargalló, N., Gastó, C., Bernardo, M., Junqué, C., 2013. Brain Effects of Cognitive Remediation Therapy in Schizophrenia: A Structural and Functional Neuroimaging Study. *Biol. Psychiatry, Schizophrenia, Context, and Memory* 73, 1015–1023. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.01.017>
- Pérez-Fuentes, Molero Jurado, Gázquez Linares, Oropesa Ruiz, Simón Márquez, Saracostti, 2019. Self-Expressive Creativity in the Adolescent Digital Domain: Personality, Self-Esteem, and Emotions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 4527. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224527>
- Pero, S., Incoccia, C., Caracciolo, B., Zocolotti, P., Formisano, R., 2006. Rehabilitation of attention in two patients with traumatic brain injury by means of ‘attention process training.’ *Brain Inj.* 20, 1207–1219. <https://doi.org/10.1080/02699050600983271>
- Poincaré, H., 1908. *Science et méthode*, Flammarion. ed, Bibliothèque de philosophie scientifique. Paris.
- Poulose, S.M., Miller, M.G., Scott, T., Shukitt-Hale, B., 2017. Nutritional Factors Affecting Adult Neurogenesis and Cognitive Function. *Adv. Nutr.* 8, 804–811. <https://doi.org/10.3945/an.117.016261>
- Radel, R., Davranche, K., Fournier, M., Dietrich, A., 2015. The role of (dis)inhibition in creativity: Decreased inhibition improves idea generation. *Cognition* 134, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.09.001>

- 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. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 676–682. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676>
- Ren, Z., Yang, W., Qiu, J., 2019. Neural and genetic mechanisms of creative potential. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.09.003>
- Rhodes, M., 1961. An analysis of creativity. *Phi Delta Kappan* 42, 305–310.
- Riegel, K.F., Riegel, R.M., Levine, R.S., 1966. An analysis of associative behavior and creativity. *J. Pers. Soc. Psychol.* 4, 50–56. <https://doi.org/10.1037/h0023522>
- Rigon, A., Reber, J., Patel, N.N., Duff, M.C., 2020. Traumatic brain injury and creative divergent thinking. *Brain Inj.* 1–8. <https://doi.org/10.1080/02699052.2020.1753810>
- Rigon, A., Reber, J., Patel, N.N., Duff, M.C., 2018. Convergent thinking and traumatic brain injury: an investigation of performance on the remote associate test. *Brain Inj.* 32, 1110–1114. <https://doi.org/10.1080/02699052.2018.1483031>
- Ritter, S.M., Gu, X., Crijns, M., Biekens, P., 2020. Fostering students' creative thinking skills by means of a one-year creativity training program. *PLOS ONE* 15, e0229773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229773>
- Rodakowski, J., Saghabi, E., Butters, M.A., Skidmore, E.R., 2015. Non-pharmacological interventions for adults with mild cognitive impairment and early stage dementia: An updated scoping review. *Mol. Aspects Med., Towards prevention and therapy of Alzheimer's disease* 43–44, 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2015.06.003>
- Rohling, M.L., Faust, M.E., Beverly, B., Demakis, G., 2009. Effectiveness of cognitive rehabilitation following acquired brain injury: A meta-analytic re-examination of Cicerone et al.'s (2000, 2005) systematic reviews. *Neuropsychology* 23, 20–39. <https://doi.org/10.1037/a0013659>
- Rutgers, D.R., Fillard, P., Paradot, G., Tadié, M., Lasjaunias, P., Ducreux, D., 2008. Diffusion Tensor Imaging Characteristics of the Corpus Callosum in Mild, Moderate, and Severe Traumatic Brain Injury. *Am. J. Neuroradiol.* 29, 1730–1735. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A1213>
- S. Colzato, L., Szapora, A., Pannekoek, J.N., Hommel, B., 2013. The impact of physical exercise on convergent and divergent thinking. *Front. Hum. Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00824>
- Saad, G., Cleveland, M., Ho, L., 2015. Individualism–collectivism and the quantity versus quality dimensions of individual and group creative performance. *J. Bus. Res.* 68, 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2014.09.004>
- Sadler-Smith, E., 2015. Wallas' Four-Stage Model of the Creative Process: More Than Meets the Eye? *Creat. Res. J.* 27, 342–352. <https://doi.org/10.1080/10400419.2015.1087277>
- Saggar, M., Quintin, E.-M., Bott, N.T., Kienitz, E., Chien, Y., Hong, D.W.-C., Liu, N., Royalty, A., Hawthorne, G., Reiss, A.L., 2016. Changes in Brain Activation Associated with Spontaneous Improvization and Figural Creativity After Design-Thinking-Based Training: A Longitudinal fMRI Study. *Cereb. Cortex* bhw171. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw171>
- Sasaki, M., Iversen, J., Callan, D.E., 2019. Music Improvisation Is Characterized by Increase EEG Spectral Power in Prefrontal and Perceptual Motor Cortical Sources and Can be Reliably Classified From Non-improvisatory Performance. *Front. Hum. Neurosci.* 13, 435. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00435>
- Sasaoka, T., Mizuhara, H., Inui, T., 2014. Dynamic Parieto-premotor Network for Mental Image Transformation Revealed by Simultaneous EEG and fMRI Measurement. *J. Cogn. Neurosci.* 26, 232–246. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00493
- Schooler, Jonathan W., Ohlsson, S., Brooks, K., 1993. Thoughts Beyond Words: When Language Overshadows Insight. *J. Exp. Psychol.* 122, 166–183.
- Schooler, Jonathan W., Ohlsson, S., Brooks, K., 1993. Thoughts beyond words : when language overshadows insight. *J. Exp. Psychol.* 122, 166–183.

- Scott, G., Leritz, L.E., Mumford, M.D., 2004. Types of creativity training: Approaches and their effectiveness. *J. Creat. Behav.* 38, 149–179. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.2004.tb01238.x>
- Shabir, A., Hooton, A., Tallis, J., F Higgins, M., 2018. The Influence of Caffeine Expectancies on Sport, Exercise, and Cognitive Performance. *Nutrients* 10. <https://doi.org/10.3390/nu10101528>
- Shallice, T., 1982. Specific impairments of planning. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 298, 199–209.
- Shao, Y., Zhang, C., Zhou, J., Gu, T., Yuan, Y., 2019. How Does Culture Shape Creativity? A Mini-Review. *Front. Psychol.* 10, 1219. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01219>
- Shi, B., Cao, X., Chen, Q., Zhuang, K., Qiu, J., 2017. Different brain structures associated with artistic and scientific creativity: a voxel-based morphometry study. *Sci. Rep.* 7. <https://doi.org/10.1038/srep42911>
- Shi, L., Sun, J., Xia, Y., Ren, Z., Chen, Q., Wei, D., Yang, W., Qiu, J., 2018. Large-scale brain network connectivity underlying creativity in resting-state and task fMRI: Cooperation between default network and frontal-parietal network. *Biol. Psychol.* 135, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.03.005>
- Simon, H.A., 1975. The functional equivalence of problem solving skills. *Cognit. Psychol.* 7, 268–288. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90012-2)
- Simon, J.R., Rudell, A.P., 1967. Auditory SR compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *J. Appl. Psychol.* 51, 300.
- Simonton, D.K., 2000. Cognitive, Personal, Developmental, and Social Aspects. *Am. Psychol.* 55, 151–158.
- Simonton, D.K., 1999. *Origins of genius: Darwinian perspectives on creativity.*, Oxford University Press, New York, NY, US.
- Small, G.W., Silverman, D.H.S., Siddarth, P., Ercoli, L.M., Miller, K.J., Lavretsky, H., Wright, B.C., Bookheimer, S.Y., Barrio, J.R., Phelps, M.E., 2006. Effects of a 14-day healthy longevity lifestyle program on cognition and brain function. *Am. J. Geriatr. Psychiatry Off. J. Am. Assoc. Geriatr. Psychiatry* 14, 538–545. <https://doi.org/10.1097/01.JGP.0000219279.72210.ca>
- Sprague, B.N., Freed, S.A., Webb, C.E., Phillips, C.B., Hyun, J., Ross, L.A., 2019. The impact of behavioral interventions on cognitive function in healthy older adults: A systematic review. *Ageing Res. Rev.* 52, 32–52. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2019.04.002>
- Stenberg, R.J., Lubart, T., 1996. Investing in Creativity. *Am. Psychol.* 51, 677–688.
- Stevenson, C.E., Kleibeuker, S.W., de Dreu, C.K.W., Crone, E.A., 2014. Training creative cognition: adolescence as a flexible period for improving creativity. *Front. Hum. Neurosci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00827>
- Storm, B.C., Angello, G., Bjork, E.L., 2011. Thinking can cause forgetting: Memory dynamics in creative problem solving. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 37, 1287–1293. <https://doi.org/10.1037/a0023921>
- Strasser, B., Gostner, J.M., Fuchs, D., 2016. Mood, food, and cognition: role of tryptophan and serotonin. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 19, 55–61. <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000237>
- Sutin, A.R., Beason-Held, L.L., Resnick, S.M., Costa, P.T., 2009. Sex Differences in Resting-State Neural Correlates of Openness to Experience among Older Adults. *Cereb. Cortex* 19, 2797–2802. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp066>
- Takeuchi, H., Sekiguchi, A., Taki, Y., Yokoyama, S., Yomogida, Y., Komuro, N., Yamanouchi, T., Suzuki, S., Kawashima, R., 2010. Training of working memory impacts structural connectivity. *J. Neurosci.* 30, 3297–3303. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4611-09.2010>
- Takeuchi, H., Taki, Y., Hashizume, H., Sassa, Y., Nagase, T., Nouchi, R., Kawashima, R., 2012. The Association between Resting Functional Connectivity and Creativity. *Cereb. Cortex* 22, 2921–2929. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr371>

- Takeuchi, H., Taki, Y., Hashizume, H., Sassa, Y., Nagase, T., Nouchi, R., Kawashima, R., 2011. Failing to deactivate: The association between brain activity during a working memory task and creativity. *NeuroImage* 55, 681–687. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.052>
- Takeuchi, Hikaru, Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Fukushima, A., Kawashima, R., 2010a. Regional gray matter volume of dopaminergic system associate with creativity: Evidence from voxel-based morphometry. *NeuroImage* 51, 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.078>
- Takeuchi, Hikaru, Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Fukushima, A., Kawashima, R., 2010b. White matter structures associated with creativity: Evidence from diffusion tensor imaging. *NeuroImage* 51, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.035>
- Taki, Y., Thyreau, B., Kinomura, S., Sato, K., Goto, R., Wu, K., Kawashima, R., Fukuda, H., 2013. A longitudinal study of the relationship between personality traits and the annual rate of volume changes in regional gray matter in healthy adults: Personality Traits and Gray Matter Volume Change. *Hum. Brain Mapp.* 34, 3347–3353. <https://doi.org/10.1002/hbm.22145>
- Tang, Y.-Y., Posner, M.I., 2014. Training brain networks and states. *Trends Cogn. Sci.* 18, 345–350.
- Tang, Y.-Y., Posner, M.I., 2009. Attention training and attention state training. *Trends Cogn. Sci.* 13, 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.01.009>
- Taya, F., Sun, Y., Babiloni, F., Thakor, N., Bezerianos, A., 2015. Brain enhancement through cognitive training: a new insight from brain connectome. *Front. Syst. Neurosci.* 9, 44. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00044>
- Tik, M., Sladky, R., Luft, C.D.B., Willinger, D., Hoffmann, A., Banissy, M.J., Bhattacharya, J., Windischberger, C., 2018. Ultra-high-field fMRI insights on insight: Neural correlates of the Aha!-moment. *Hum. Brain Mapp.* 39, 3241–3252. <https://doi.org/10.1002/hbm.24073>
- Tiret, L., HAUSHERR, E., THICOIPE, M., GARROS, B., MAURETTE, P., CASTEL, J.-P., HATTON, F., 1990. The epidemiology of head trauma in Aquitaine (France), 1986: a community-based study of hospital admissions and deaths. *Int. J. Epidemiol.* 19, 133–140.
- To, M.J., O'Brien, K., Palepu, A., Hubley, A.M., Farrell, S., Aubry, T., Gogosis, E., Muckle, W., Hwang, S.W., 2015. Healthcare Utilization, Legal Incidents, and Victimization Following Traumatic Brain Injury in Homeless and Vulnerably Housed Individuals: A Prospective Cohort Study. *J. Head Trauma Rehabil.* 30, 270–276. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000044>
- Tobar, E., Alvarez, E., Garrido, M., 2017. Cognitive stimulation and occupational therapy for delirium prevention. *Rev. Bras. Ter. Intensiva* 29, 248–252. <https://doi.org/10.5935/0103-507X.20170034>
- Torrance, E.P., 1976. Creativity testing in education. *Creat. Child Adult Q.*
- Torrance, E.P., 1972. Predictive validity of the Torrance tests of creative thinking. *J. Creat. Behav.* 6, 236–262.
- Twamley, E.W., Jeste, D.V., Bellack, A.S., 2003. A review of cognitive training in schizophrenia. *Schizophr. Bull.* 29, 359–382. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.schbul.a007011>
- Valenzuela, M.J., Jones, M., Wen, W., Rae, C., Graham, S., Shnier, R., Sachdev, P., 2003. Memory training alters hippocampal neurochemistry in healthy elderly. *Neuroreport* 14, 1333–1337. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000077548.91466.05>
- Valenzuela, M.J., Sachdev, P., Wen, W., Chen, X., Brodaty, H., 2008. Lifespan mental activity predicts diminished rate of hippocampal atrophy. *PLoS One* 3, e2598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002598>
- Vallat-Azouvi, C., 2019. Evaluation et rééducation de patients victimes de lésions cérébrales acquises non dégénératives (Note de sythèse pour l'obtention d'une HDR). Paris 8.
- Vallat-Azouvi, C., Pradat- Diehl, P., 2009. Rehabilitation of the central executive of working memory after severe traumatic brain injury: two single-case studies. *Brain Inj.* 23, 585–594.
- Van der Linden, M., Adam, S., Agniel, A., Baisset Mouly, C., 2004. L'évaluation des troubles de la mémoire: Présentation de quatre tests de mémoire épisodique (avec leur étalonnage).

- Vartanian, O., Wertz, C.J., Flores, R.A., Beatty, E.L., Smith, I., Blackler, K., Lam, Q., Jung, R.E., 2018. Structural correlates of Openness and Intellect: Implications for the contribution of personality to creativity. *Hum. Brain Mapp.* 39, 2987–2996. <https://doi.org/10.1002/hbm.24054>
- Vemuri, P., Fields, J., Peter, J., Klöppel, S., 2016. Cognitive interventions in Alzheimer’s and Parkinson’s diseases: emerging mechanisms and role of imaging. *Curr. Opin. Neurol.* 29, 405–411. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000346>
- Wallas, G., 1926. *The art of thought.*, The art of thought. London, J. Cape.
- Walpole, H., 1840. Letter to Sir Horace Mann, written on 28 January, 1754. *Lett. Horace Walpole Fourth Earl Orford 2*, 364–367.
- Walton, C.C., Kavanagh, A., Downey, L.A., Lomas, J., Camfield, D.A., Stough, C., 2015. Online cognitive training in healthy older adults: a preliminary study on the effects of single versus multi-domain training. *Transl. Neurosci.* 6, 13–19. <https://doi.org/10.1515/tnsci-2015-0003>
- Wang, H., Cheng, Y., 2016. Dissecting language creativity: English proficiency, creativity, and creativity motivation as predictors in EFL learners’ metaphoric creativity. *Psychol. Aesthet. Creat. Arts* 10, 205–213. <https://doi.org/10.1037/aca0000060>
- Wang, J.-R., Hsieh, S., 2013. Neurofeedback training improves attention and working memory performance. *Clin. Neurophysiol.* 124, 2406–2420. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.05.020>
- Ward, N., Paul, E., Watson, P., Cooke, G.E., Hillman, C.H., Cohen, N.J., Kramer, A.F., Barbey, A.K., 2017. Enhanced Learning through Multimodal Training: Evidence from a Comprehensive Cognitive, Physical Fitness, and Neuroscience Intervention. *Sci. Rep.* 7, 5808. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06237-5>
- Wechsler, D., 2008. *WAIS-IV: Wechsler adult intelligence scale.* Psychological Corporation.
- Wechsler, D., 2001. *MEM-III: Echelle clinique de mémoire de Wechsler.* Éditions du Centre de psychologie appliquée.
- Wei, D., Yang, J., Li, W., Wang, K., Zhang, Q., Qiu, J., 2014. Increased resting functional connectivity of the medial prefrontal cortex in creativity by means of cognitive stimulation. *Cortex* 51, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.09.004>
- Weinberger, A.B., Green, A.E., Chrysiou, E.G., 2017. Using Transcranial Direct Current Stimulation to Enhance Creative Cognition: Interactions between Task, Polarity, and Stimulation Site. *Front. Hum. Neurosci.* 11, 246. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00246>
- Wertz, C.J., Chohan, M.O., Ramey, S.J., Flores, R.A., Jung, R.E., 2020. White matter correlates of creative cognition in a normal cohort. *NeuroImage* 208, 116293. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116293>
- Westerberg, H., Klingberg, T., 2007. Changes in cortical activity after training of working memory — a single-subject analysis. *Physiol. Behav., Karolinska Institutet - Neuroscience* 92, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.05.041>
- Winklewski, P.J., Sabisz, A., Naumczyk, P., Jodzio, K., Szurowska, E., Szarmach, A., 2018. Understanding the Physiopathology Behind Axial and Radial Diffusivity Changes—What Do We Know? *Front. Neurol.* 9. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00092>
- Wu, X., Jung, R.E., Zhang, H., 2016. Neural underpinnings of divergent production of rules in numerical analogical reasoning. *Biol. Psychol.* 117, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.03.011>
- Xu, X., Pang, W., 2020. Reading thousands of books and traveling thousands of miles: Diversity of life experience mediates the relationship between family SES and creativity. *Scand. J. Psychol.* 61, 177–182. <https://doi.org/10.1111/sjop.12591>
- Yagolkovskiy, S.R., 2016. Stimulation of Individual Creativity in Electronic Brainstorming: Cognitive and Social Aspects. *Soc. Behav. Personal. Int. J.* 44, 761–766. <https://doi.org/10.2224/sbp.2016.44.5.761>

- Yamaoka, A., Yukawa, S., 2019. Does Mind Wandering During the Thought Incubation Period Improve Creativity and Worsen Mood? *Psychol. Rep.* 003329411989603. <https://doi.org/10.1177/0033294119896039>
- Yasuno, F., Kudo, T., Yamamoto, A., Matsuoka, K., Takahashi, M., Iida, H., Ihara, M., Nagatsuka, K., Kishimoto, T., 2017. Significant correlation between openness personality in normal subjects and brain myelin mapping with T1/T2-weighted MR imaging. *Heliyon* 3, e00411. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00411>
- Zabelina, D.L., Silvia, P.J., 2020. Percolating ideas: The effects of caffeine on creative thinking and problem solving. *Conscious. Cogn.* 79, 102899. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.102899>
- Zalonis, I., Kararizou, E., Triantafyllou, N.I., Kapaki, E., Papageorgiou, S., Sgouropoulos, P., Vassilopoulos, D., 2008. A normative study of the trail making test A and B in Greek adults. *Clin. Neuropsychol.* 22, 842–850.
- Zhao, Y., Yuan, Y., Shen, W., Zhu, C., Liu, D., 2019. The relationships between bilingual learning, willingness to study abroad and convergent creativity. *PeerJ* 7, e7776. <https://doi.org/10.7717/peerj.7776>
- Zhong, C.-B., Dijksterhuis, A., Galinsky, A.D., 2008. The Merits of Unconscious Thought in Creativity. *Psychol. Sci.* 19, 912–918. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02176.x>
- Zhu, W., Chen, Q., Xia, L., Beaty, R.E., Yang, W., Tian, F., Sun, J., Cao, G., Zhang, Q., Chen, X., Qiu, J., 2017. Common and distinct brain networks underlying verbal and visual creativity: Brain Networks Underlying Verbal and Visual Creativity. *Hum. Brain Mapp.* 38, 2094–2111. <https://doi.org/10.1002/hbm.23507>
- Zimmermann, P., Fimm, B., 2007. Test for Attentional Performance (TAP) (Version 2.2) [Operating Manual].

RESUME

Stenberg et Lubart définissent en 1996 la créativité comme la capacité à produire un travail nouveau et approprié à la tâche. Dans des pathologies comme le Traumatisme Crânien (TC) la capacité à faire face et à être innovant est primordiale pour une récupération optimale. Actuellement la réinsertion professionnelle des patients TC n'est pas idéale, seulement la moitié d'entre eux retrouve une activité professionnelle dans les années qui suivent l'accident. Certaines rééducations dites holistiques dispensent une prise en charge globale de l'individu en s'appuyant sur des facteurs cognitifs, psychologiques, émotionnels et environnementaux. D'après Lubart et al. (2003), le point commun entre ces facteurs serait le potentiel créatif.

Ceci met en lumière l'importance d'une meilleure caractérisation des processus créatifs pour améliorer la rééducation holistique chez les patients TC. La créativité est sous-tendue par de multiples facteurs qui interagissent entre eux or, elle est souvent étudiée à partir d'un seul facteur. C'est pourquoi dans une première étude, nous avons adopté une vision plus large de l'individu, en différenciant le niveau de créativité de 45 adultes sains sur la base d'un modèle de fonctionnement cognitif construit grâce à la modélisation d'équation structurelle (SEM-PLS). Ce modèle suppose l'influence de la mémoire de travail et de la pensée analytique sur la créativité. L'étude en IRMf de l'activité cérébrale de repos de ces sujets a révélé que les personnes très créatives ont une connectivité fonctionnelle augmentée dans le réseau attentionnel (AN) et le réseau du mode par défaut (DMN). Ces résultats, en accord avec les théories cognitives de la créativité nous ont conduit à l'appréhender et à la stimuler grâce à une approche holistique plus basée sur un fonctionnement cognitif que sur des fonctions cognitives stimulées de façon indépendante.

Dans une deuxième étude, nous avons construit sur la base de 83 sujets adultes sains un modèle cognitif (SEM-PLS) stipulant l'influence de l'inhibition, de la flexibilité et du raisonnement sur la pensée innovante qui est nécessaire à la créativité. Ce modèle nous a permis d'évaluer l'impact d'un entraînement en résolution de problèmes créatifs sur le fonctionnement cognitif et cérébral de 16 sujets. Un deuxième groupe de 15 sujets entraînés avec des mots croisés nous a permis d'évaluer la spécificité des effets de l'entraînement et enfin un troisième groupe sans entraînement de 52 sujets nous a servi de contrôle. Les résultats ont montré que, pour le groupe contrôle et celui entraîné avec les mots croisés, la pensée innovante est influencée par le raisonnement, alors que pour le groupe entraîné en résolution de problèmes, elle est influencée par la flexibilité. Cette modification s'accompagne d'une augmentation de la connectivité cérébrale de repos dans l'AN et le réseau visuel (VN). Ces résultats démontrent qu'un entraînement cognitif basé sur la résolution de problème favorise la pensée innovante en changeant la façon dont le sujet recrute les processus cognitifs nécessaires à la résolution du problème. Ce changement est sous-tendu par des modifications de la connectivité fonctionnelle de réseaux de repos.

Ces résultats positifs nous ont conduit dans une dernière étape à élaborer et évaluer un entraînement holistique basé sur la créativité à destination de patients TC. L'évaluation de cet entraînement chez 3 TC a montré une amélioration cognitive globale accompagnée par des changements structuraux évalués par l'imagerie en tenseur de diffusion.

L'ensemble de ces résultats, souligne que la créativité est une fonction à développer dans la prise en charge des patients car elle permet une meilleure récupération cognitive et peut ainsi favoriser leur réinsertion socio- professionnelle. De plus, son étude doit impérativement se faire de façon plus holistique afin d'intégrer les multiples facteurs qui la sous-tendent.