



HAL
open science

Mécanismes neurocognitifs permettant et facilitant la résolution de problèmes créatifs

Théophile Bieth

► **To cite this version:**

Théophile Bieth. Mécanismes neurocognitifs permettant et facilitant la résolution de problèmes créatifs. Sciences cognitives. Sorbonne Université, 2022. Français. NNT : 2022SORUS488 . tel-04247100

HAL Id: tel-04247100

<https://theses.hal.science/tel-04247100v1>

Submitted on 18 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sorbonne Université

École doctorale Cerveau Cognition Comportement

Institut du Cerveau (Pr Alexis Brice), équipe FrontLab (Pr Richard Levy)

Mécanismes neurocognitifs permettant et facilitant la résolution de problèmes créatifs

—

Par Théophile Bieth

Thèse de doctorat de Neurosciences Cognitives

Dirigée par Dr Emmanuelle Volle et
co-encadrée par Dr Delphine Oudiette

Présentée et soutenue publiquement le 17 octobre 2022

Devant un jury composé de :

Dr. Baptiste BARBOT	Rapporteur	Université de Louvain
Dr. Marion BOTELLA	Rapporteur	Université Paris Cité
Dr. Fabrizio DE VICO FALLANI	Examineur	Sorbonne Université
Dr. Valentina LA CORTE	Examineur	Université Paris Cité
Dr. Perrine RUBY	Examineur	Université de Lyon
Dr. Emmanuel SANDER	Examineur	Université de Genève

« Mes chers amis,
C'est le hasard, et non pas la gravité, qui a fait tomber une pomme sur la tête de Newton.
C'est le hasard, et non pas la radioactivité, qui a envoyé des radiations sur Pierre et Marie Curie.
Ah, le hasard ! Cette manifestation d'un monde qui se dévoile ! Il dérange, parce qu'on ne sait pas l'expliquer, il agace parce que quelquefois, il bouleverse nos certitudes.
Mais ce n'est pas seulement grâce à ses explications posthumes et à ses certitudes qu'un homme avance, c'est aussi grâce à son imagination et à sa capacité à croire en la subtilité de ce monde qui se dévoile. Ce monde est loin d'être cet enchaînement de mécanismes.
Celui qui aura compris cela, résoudra toutes les équations »

Passage de Yamen Mani
La marche de l'incertitude, 2010

RESUME

Résoudre des problèmes fait partie de notre quotidien. Cela nous permet de faire face à des situations nouvelles, de surmonter des obstacles et d'exprimer notre créativité. Pourtant, les mécanismes neurocognitifs et modulateurs de la résolution de problèmes sont peu étudiés et non élucidés. La restructuration est un mécanisme avancé pour expliquer comment un individu résout un problème. Elle fait référence aux processus permettant de modifier la représentation d'un problème par la création de nouvelles associations d'idées éloignées en mémoire. Elle est souvent associée à l'expérience d'un « Eureka ! ». De ce fait, la restructuration est étroitement liée aux théories cognitives de la créativité (i.e., la capacité à générer des idées nouvelles, originales et adaptées) et du raisonnement par analogie (i.e., établir des liens entre des éléments éloignés du fait de la détection de similarités structurelles).

Bien que la théorie de la restructuration soit intuitive, ses preuves empiriques sont rares et non satisfaisantes, notamment en raison des difficultés méthodologiques pour la capturer et la mesurer. Nous avons développé un nouvel outil basé sur la construction de réseaux sémantiques qui permet de refléter la manière dont un individu se représente un problème. Ces réseaux sémantiques sont composés de nœuds correspondant à des mots en rapport avec un problème, connectés par des liens représentant la distance sémantique entre chaque paire de nœuds. En évaluant les changements d'organisation de ces réseaux au cours de la résolution d'un problème, nous pouvons capturer et mesurer des changements représentationnels du problème (i.e., la restructuration).

Dans cette thèse, nous avons abordé la question des mécanismes neurocognitifs permettant ou facilitant la résolution de problèmes à travers la théorie de la restructuration via les réseaux sémantiques. Dans la première partie de cette thèse, nous avons montré que les processus de restructurations étaient impliqués dans la résolution de problèmes créatifs et analogues. En particulier, nous avons montré que les changements qui s'opéraient dans les réseaux sémantiques au niveau de nœuds et liens évalués comme pertinent pour résoudre un problème étaient associés à sa résolution et celle d'un problème analogue. Ces résultats

démontrent le lien étroit existant entre restructuration et résolution de problèmes et font discuter son rôle mécanistique. Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons exploré les corrélats neuronaux associés à deux mécanismes impliqués dans la restructuration : l'effet de l'éloignement sémantique dans la création d'associations d'idées et celui d'une résolution avec Eurêka. Nous avons montré que ces processus présentaient des signatures électrophysiologiques spécifiques offrant de nouvelles perspectives dans l'étude des bases neurales de la restructuration et de la résolution de problèmes. Enfin, dans la dernière partie, nous avons exploré le sommeil paradoxal comme facteur modulateur de la restructuration et de la résolution de problèmes. Nous avons démontré que le sommeil paradoxal était associé à un état mental d'hyper-associativité permettant de faciliter la réorganisation de nos associations d'idées relatives à un problème, comme plusieurs modèles théoriques le suggéraient. Cependant, trouver la solution au problème n'était pas facilité par le sommeil, faisant discuter sa place dans la résolution de problèmes.

Pour conclure, cette thèse offre de nouveaux résultats permettant de mieux comprendre la place de la restructuration dans la résolution de problèmes à plusieurs niveaux mécanistiques. Notre outil de mesure de restructuration ouvre la voie à de nombreuses perspectives d'études afin de préciser les mécanismes de résolution de problèmes, de déterminer ses corrélats neuronaux et d'étudier d'autres facteurs pouvant les moduler, avec un impact attendu positif tant à l'échelle individuelle que sociétale.

ABSTRACT

Problem-solving is central to everyday life and is critical for adapting to new situations, overcoming challenges, and expressing our creativity. However, the mechanisms underlying problem-solving remain largely unknown. Restructuring is described as a key problem-solving mechanism allowing the generation of new problem representations by creating remote association of ideas. Restructuring has been tightly linked to insight solving and the cognitive theory of creativity (i.e., the ability to create new, original, and adapted ideas), but also to analogical reasoning (i.e., the ability to create relationships between remote elements based on the detection of structural similarities).

Although restructuring theory is intuitively pleasant, empirical evidence is scarce and not fully satisfying, mainly because it was never clearly operationalized nor measured. We developed a new tool based on semantic networks building. These semantic networks were composed of nodes which were words related to the problem and that were connected by edges representing semantic similarity. The semantic network organization can reflect how individuals can represent the problem. By measuring changes in organization of several semantic networks during problem-solving, we were able to quantify changes in problem representation (i.e., restructuring).

In this thesis, we investigated the neurocognitive mechanisms allowing or facilitating problem-solving, and especially restructuring processes using our semantic network tool. In the first part of the thesis, we showed that restructuring was involved in successful problem-solving. Specifically, we found that semantic network changes (targeting nodes and edges that were relevant in solving the problem) were associated with successful solving of the problem and an analogue one. These results emphasize the restructuring processes in problem-solving, and their mechanistic role. In the second part of the thesis, we explored the neural correlates related to two relevant mechanisms involved in restructuring: the effect of semantic remoteness in idea associations creation and insight solving. We found distinct patterns of brain activity in the time-frequency domain for these two aspects offering new perspectives for investigating neural bases of restructuring and problem-solving. In the last part of the

thesis, we investigated whether rapid eye movement (REM) sleep could favor restructuring and problem-solving. We found that REM sleep was associated with a hyper associativity mental state that facilitated the reorganization of idea associations, as several theoretical models have suggested. However, problem-solving was not facilitated by sleep, questioning its role in problem-solving.

To conclude, this thesis offers new insight on the role of restructuring in problem-solving at several levels. By measuring restructuring processes, our tool opens the door to further studies that aim to precise problem-solving mechanisms, to describe neural correlates and to study other factors that can influence such processes. It can lead to potential positive impact at both individual level and society.

REMERCIEMENTS

Malgré plusieurs remarques de mes directrices de thèse, l'utilisation du « nous » dans la rédaction de cette thèse est un souhait. L'objectif n'est pas d'alimenter leur frustration lors de la relecture du manuscrit (#Frustration), ni de ne pas assumer mon travail. Ce « nous » me permet simplement de replacer mon travail dans une réalité. Celle d'une équipe, de collègues, d'amis, d'une famille, sans qui ces mots ne pourraient pas être écrits aujourd'hui, sur cette page de remerciement. Alors, le « nous » va laisser sa place au « je », afin de d'exprimer ici toute ma reconnaissance.

Je souhaite dans un premier temps remercier les membres du jury d'avoir accepté de prendre le temps de s'intéresser à mon travail afin de l'évaluer, le critiquer, le discuter. J'espère que derrière cet exercice académique vous aurez trouvé un intérêt personnel et professionnel. Merci à Baptiste Barbot, Marion Botella, Fabrizio De Vico Fallani, Valentina La Corte, Perrine Ruby et Emmanuel Sander.

Derrière ce « nous », il y a tout d'abord et avant tout mes directrices de thèse. Emmanuelle est et sera toujours pour moi une figure exemplaire. Travailler à tes côtés depuis toutes ces années a toujours été un réel plaisir. Je n'aurais jamais imaginé arrivé jusque-là aujourd'hui et c'est en grande partie grâce à ton enseignement et ta personne. Tes conseils ont toujours été très précieux et payant. Delphine, tu es un puits d'énergie et de connaissances. On apprend avec toi qu'il n'y a jamais de problèmes, pas de stress, et qu'absolument tout est possible, même à la dernière minute. Je vous remercie toutes les deux pour votre partage de connaissances, votre confiance à mon égard, votre disponibilité et votre bonne humeur. Les réunions du mercredi étaient pour moi toujours plaisante et seront un réel manque dans ma semaine. Je suis fière d'avoir travaillé à vos côtés et de pouvoir écrire mon nom au côté des vôtres dans nos publications à venir. Cela me conduit à remercier également les collaborateurs impliqués dans mes travaux de recherche (Yoed et Nathalie) qui ont été une source de motivation et de conseils enrichissants.

Derrière ce « nous », il y a aussi la CréaTeam, sans qui le quotidien au labo serait moins drôle. C'est avec elle que j'ai partagé mes obstacles et difficultés, mes joies et mes déceptions, mes incertitudes et mes nouvelles idées. Je n'oublierai jamais cette période de confinement passé à vos côtés où nous avons fait preuve d'une réelle cohésion pour rendre le quotidien fleuri. Marcela, tu as été une co-doctorante remarquable. Nous avons commencé ensemble notre parcours de recherche et c'est avec une certaine fierté que je termine cette page du doctorat à tes côtés. Tes conseils, nos discussions, ton expérience m'ont été d'une aide précieuse. Alizée, tu as été ma référente statistique, me faisant évoluer de #Ckoi1moyenne à #MétaGLM : merci pour ta disponibilité et ton partage aveugle de savoir (toc toc, « Oui ? » « Salut Alizée, j'ai un problème avec mes stats », « Oh trop bien ! Prend une chaise et assied toi ! » ...). Un merci particulier à Sarah (aka SJW) toujours attentive aux autres (même très tôt le matin). Je remercie aussi tous les autres membres de la CréaTeam que j'ai pu croiser sur mon chemin : Victor, Marie, Inès, Saoussen, Caroline, Célia.

Mais la CréaTeam n'est rien sans le FrontLab. Ainsi, je remercie également tous les membres du laboratoire. Je remercie particulièrement Richard, qui en m'accueillant dans son laboratoire, m'a initié à la recherche en neurosciences, à l'image de son accueil dans son service il y a plusieurs années pour m'initier à la neurologie. Mes remerciements vont aussi aux autres figures du FrontLab qui ont toujours eu un regard constructif et intéressé sur mes travaux de recherche : Lara, Bénédicte, Emmanuel, Béatrice, Monica, Isabelle, Toni ; mais également les plus jeunes : Chloé, Clara, Valérie, Arabella, Idil, Vincent. Enfin, je n'oublierai pas la Dream Team. Même si je n'ai pas été très présent dans votre (petit) espace, j'ai apprécié votre accueil toujours souriant et très ouvert. Je remercie tous les membres de cette équipe, en particulier Arthur dont les jeux de mots à longueur de journée témoignent d'une créativité particulièrement développée (ou pas, j'hésite encore), Célia pour ces précieux conseils de sieste, Isabelle Arnulf pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet dans son service, mais également Yannis, Thomas, Céleste et Alexandrine.

Parce que je n'oublie pas d'où je viens, le « nous » inclut également toute la neurologie. Je remercie tous ceux que j'ai rencontré pendant mon parcours médical et plus particulièrement l'ensemble des équipes de la Fédération de neurologie et de l'IM2A. C'est un réel plaisir de vous retrouver ces prochaines années pour travailler à nouveau avec vous.

Derrière ce « nous », il y a ma famille. Qu'elle soit en face de chez moi ou un peu plus loin dans les terres du Sud-Ouest, ma famille est toujours derrière moi, à l'écoute de mon travail, tout en m'aidant à relativiser et à prendre du recul par moment. Je tiens à la remercier pour son soutien perpétuel dans mes aventures professionnelles. Cette thèse est un clin d'œil à mes parents qui m'ont transmis la passion des mathématiques et de la résolution de problèmes, mais également à mon frère qui a tenté de m'initier aux problèmes des blocs. Je remercie également Oscar et Charlotte qui ponctuent mes journées de photos qui me réchauffent le cœur. Cette famille s'étend aussi à la Vieille maison, où toutes les grandes figures du Luberon suivent de près mon travail avec une curiosité sans fond, toujours à l'affût des nouveautés lors de nos ascension du massif. Merci à Geneviève, Manuela, Najib, Charlotte, Bruno, Louise, Clémence, Martin, Marie, Noé.

Après la famille viennent les amis. Ils seraient difficiles de les citer tous sans en oublier. Ils sont avec moi pour certains depuis le début de ma vie, d'autres ont pris le train en route, sans oublier ceux qui ont pris un chemin différent du mien. Qu'ils viennent de la maternelle ou du lycée, des études de médecine, ou de rencontres incongrues, qu'ils soient avec moi physiquement ou dans mes souvenirs les plus enfouis, ils sont derrière moi. Je ne peux que les remercier.

J'ai toujours l'habitude de garder le meilleur pour la fin ... C'est donc sans surprise que mes remerciements se tournent maintenant vers Jeanne et Jasmine. Je vous remercie du fond du cœur pour votre patience, votre fidélité, votre amour, votre écoute. Vous n'imaginez pas comme la vie est belle à vos côtés et à quel point vous êtes pour moi une source de motivation, d'imagination et de bonheur inépuisable. A vos côtés, les problèmes sont des jeux, les obstacles permettent de faire des pirouettes et les blessures de banales égratignures.

Je vous remercie du fond du cœur et vous suis tous très reconnaissant pour votre aide au quotidien.

PUBLICATIONS ET PRESENTATIONS

PUBLICATIONS¹

Publications incluses dans la thèse

Bieth, T., Kenett, Y., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Lacaux, C., Oudiette, D.* & Volle, E.* (2021). *Dynamic changes in semantic memory structure support successful problem-solving*. Preprint

Bieth, T., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Garcin, B., Hugueville, L., Lehongre, K., Levy, R., George, N.* & Volle, E.* (2021). Time course of EEG power during creative problem-solving with insight or remote thinking. *bioRxiv*. Preprint

Bieth, T., Succimarra, M., Kenett, Y., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Lacaux, C., Ben Younes, S., Le Coz, A., Moreno Rodriguez, S., Arnulf, I., Volle, E.* & Oudiette, D* (2021). *REM sleep favors the restructuring of problem-related semantic associations*. In prep.

Publications en annexes de la thèse

Bieth, T., Lopez-Persem, A., Ovando-Tellez, M., Urbanski, M., & Volle, E. (2021). Creativity. In E. Mandonnet & G. Herbet (Éds.), *Intraoperative Mapping of Cognitive Networks : Which Tasks for Which Locations* (p. 337-354). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75071-8_20

Lopez-Persem, A.*, **Bieth, T.***, Guiet, S., Ovando-Tellez, M., & Volle, E. (2022). Through thick and thin: Changes in creativity during the first lockdown of the Covid-19 pandemic. *Frontiers in psychology*, 13.

¹ * co auteurs

Autres publications pendant la thèse

Lopez-Persem, A., Rodriguez, S. M., Ovando-Tellez, M., **Bieth, T.**, Guiet, S., Brochard, J., & Volle, E. (2022). How subjective idea valuation energizes and guides creative idea generation. *bioRxiv*.

Ovando-Tellez, M., Benedek, M., Kenett, Y. N., Hills, T., Bouanane, S., Bernard, M., Belo, J., **Bieth, T.**, & Volle, E. (2022). An investigation of the cognitive and neural correlates of semantic memory search related to creative ability. *Communications biology*, 5(1), 1-16.

Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., **Bieth, T.**, & Volle, E. (2022). Brain connectivity–based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eabl4294. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4294>

Ovando-Tellez, M., Rohaut, B., George, N., **Bieth, T.**, Hugueville, L., Ibrahim, Y., Courbet, O., Naccache, L., Levy, R., Garcin, B., & Volle, E. (2022). Does adding beer to coffee enhance the activation of drinks? An ERP study of semantic category priming. *Cognitive Neuroscience*, 13(2), 61-76. <https://doi.org/10.1080/17588928.2021.1940117>

COMMUNICATION

Communication orale

Bieth, T., *A new experimental paradigm to study analogy transfer*, Analogical minds seminar (2022)

Bieth, T., Kenett, Y., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Lacaux, C., Oudiette, D., & Volle, E. (2022). *Dynamic changes in semantic memory structure support successful problem-solving*. Blitz session.

Poster

Bieth, T., Kenett, Y., Ovando Tellez, M., Lacaux, C., Oudiette, D., & Volle, E. (2022). *Restructuring problem-related semantic associations promotes solving success*. 44(44).

Bieth, T., Ovando Tellez, M., Lopez-Persem, A., Garcin, B., Hugueville, L., Lehongre, K., George, N., & Volle, E. (2021). *Time course of EEG oscillations during creative problem solving*. 43(43).

Invitation scientifique

Bieth, T., *Cognitive mechanisms allowing or facilitating problem-solving*, Integrative neuroscience and cognition center, Université Paris Cité (2022)

Vulgarisation

Intervention filmée dans Paroles de chercheurs (2022).

SOMMAIRE

Liste des figures	15
Abréviations	17
Chapitre 1 : INTRODUCTION GENERALE	18
Préambule	19
Partie 1 : Les neurosciences de la créativité	23
1.1 Comment définir la créativité ?	24
1.2 Comment étudier la créativité ?	25
1.3 Un cerveau créatif	29
Synthèse	39
Partie 2 : Le raisonnement par analogie	40
2.1 Principes et applications du raisonnement par analogie	42
2.2 Comment étudier le raisonnement par analogie ?	46
2.3 Neuroimagerie de l'analogie	48
2.4 L'analogie créative	49
Synthèse	50
Partie 3 : La résolution de problèmes créatifs	51
3.1 La restructuration au cœur de la résolution de problèmes créatifs	52
3.2 Le transfert par analogie pour résoudre des problèmes et son lien avec la restructuration	57
Synthèse	61
Partie 4 : L'apport des sciences des réseaux	62
4.1 Histoire et application des réseaux	64
4.2 Méthodologie des réseaux	67
4.3 Les réseaux sémantiques appliqués à la créativité	71
Synthèse	75
Partie 5 : Le sommeil, un accélérateur de résolution de problèmes ?	76
5.1 Définition et moyens d'études	77
5.2 Le sommeil dans la mémoire	80
5.3 Rôle du sommeil dans la résolution de problèmes	87
Synthèse	96
Objectif	97

Chapitre 2 : ETUDES EXPERIMENTALES	103
Partie 1 : Mécanismes cognitifs de la résolution de problèmes	104
1.1 Cadre général	104
1.2 Les changements dans l'organisation de la mémoire sémantique permettent-ils de résoudre un problème créatif ?	106
1.3 Quel est le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes créatifs ?	154
Partie 2 : Mécanismes cérébraux de la résolution de problèmes	198
Quels sont les corrélats cérébraux impliqués dans la combinaison de concepts sémantiques éloignés et dans la résolution par insight ?	
Partie 3 : Mécanismes modulateurs de la résolution de problèmes	248
Le sommeil paradoxal favorise-t-il la restructuration d'associations sémantiques relatives à un problème ?	
 Chapitre 3 : DISCUSSION GENERALE	 298
Résumé synthétique	299
Partie 1 : Le phénomène de restructuration	302
1.1 Les réseaux sémantiques, un outil de mesure de la restructuration	303
1.2 La restructuration dans la résolution de problèmes	308
Partie 2 : Le sommeil comme modulateur de la restructuration	315
2.1 Le sommeil paradoxal, un inducteur de restructuration	316
2.2 Dissociation de l'effet du sommeil paradoxal sur la restructuration et la résolution de problèmes	320
2.3 Place du sommeil dans le transfert par analogie	324
2.4 L'endormissement, miroir du sommeil paradoxal	325
Partie 3 : Cerveau en restructuration	329
3.1 Approximer la restructuration par la CAT	330
3.2 Perspective dans l'étude directe des bases cérébrales de la restructuration dans la résolution de problèmes	337
Partie 4 : Une vision intégrative de la restructuration pour des applications pratiques	342
4.1 La restructuration comme potentiel outil pédagogique	343
4.2 La restructuration comme mesure d'un état mental	347
Conclusion	350

Références **352**

Annexes **387**

Modification des comportements créatifs pendant le confinement et la pandémie de la COVID-19

Pourquoi et comment étudier la créativité dans une population de patients en neurochirurgie ?

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : INTRODUCTION GENERALE

Figure 1	Approches expérimentales pour étudier la cognition créative	25
Figure 2	Hiérarchie des associations d'idées	27
Figure 3	Mécanismes neurocognitifs associés à la pensée créative	31
Figure 4	Synthèse des régions cérébrales impliquées dans la créativité	32
Figure 5	Synthèse des études lésionnelles étudiant la cognition créative	35
Figure 6	Variations oscillatoires associées à une résolution avec insight	38
Figure 7	Représentation d'une analogie à travers l'exemple du système solaire et atomique	44
Figure 8	Analogy Task	47
Figure 9	Restructuration dans la résolution de problèmes	56
Figure 10	La science des réseaux	65
Figure 11	Construction de réseaux sémantiques individuels en utilisant la RJT	66
Figure 12	Différentes méthodes pour construire des réseaux	68
Figure 13	Quantifier l'organisation de réseaux par le calcul de métriques	70
Figure 14	L'organisation de la mémoire sémantique est associée à des traits de créativité	72
Figure 15	Restructuration des réseaux sémantiques dans la résolution d'un problème	74
Figure 16	Les stades du sommeil	79
Figure 17	Active system consolidation model	81
Figure 18	Électrophysiologie de la consolidation mnésique pendant le sommeil	83
Figure 19	Le sommeil paradoxal dans la résolution de problèmes	90
Figure 20	Effet du N1 dans la résolution de problèmes	91
Figure 21	BiOtA model	94

Chapitre 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

Figure 22	Cadre expérimental général	105
Figure 23	Objectifs de l'étude 1A	107
Figure 24	Objectifs de l'étude 1B	155
Figure 25	Objectifs de l'étude 2	200
Figure 26	Objectifs de l'étude 3	250

Chapitre 3 : DISCUSSION GENERALE

Figure 27	Vision synthétique des principaux résultats des études présentées	300
Figure 28	Mécanismes permettant la restructuration	308
Figure 29	Hypothèse pour une vision plus globale du sommeil dans la restructuration et la résolution de problèmes	324
Figure 30	Le Eurêka comme une erreur de prédiction positive	332
Figure 31	Application du CPM à la restructuration et la résolution de problèmes	338

ABREVIATIONS

CAT	Combined Associates Task
EEG	Électroencéphalographie
IRM	Imagerie par résonance magnétique
PGO	Ponto-géniculo-occipitale (onde)
RJT	Relatedness Judgement Task
SATT	Schema analogy transfer task
TMR	Targeted Memory Reactivation

Chapitre 1

INTRODUCTION GENERALE

Préambule

Partie 1 : Les neurosciences de la créativité

Partie 2 : Le raisonnement par analogie

Partie 3 : La résolution de problèmes créatifs

Partie 4 : L'apport des sciences des réseaux

Partie 5 : Le sommeil, un accélérateur de résolution de problèmes ?

Objectifs

PREAMBULE

Tous les jours, nous sommes confrontés à de nouveaux problèmes : que ce soit dans notre vie quotidienne (comment cuisiner un repas à partir des contraintes imposées par le contenu de mon frigidaire ?), dans notre travail (comment organiser mon temps de travail ?), ou encore sur des enjeux sociétaux (comment lutter contre le réchauffement climatique ?). Dès l'enfance, la résolution de problèmes, qui est au cœur des apprentissages en mathématiques, fait l'objet d'un programme spécifique de l'éducation nationale en France. Résoudre des problèmes nous permet de faire face à des situations inconnues, de nous adapter rapidement au changement et d'apprendre de nouveaux concepts. Plus encore, la résolution de problème peut conduire à l'émergence de grandes découvertes scientifiques et innovations technologiques, et participe ainsi à l'évolution de notre société.

Paradoxalement, la **résolution de problèmes** reste encore aujourd'hui une capacité mentale mystérieuse. **Quelles sont les étapes mentales qui permettent de résoudre un problème ? Quelles régions cérébrales s'activent et se connectent pendant le processus de résolution d'un problème ? Quels facteurs peuvent modifier nos capacités à résoudre des problèmes et de quelle manière ?** Ces questions sont peu explorées et irrésolues. Pourtant, les connaissances dans ce domaine pourraient permettre de comprendre des difficultés individuelles lorsqu'elles existent, et développer des interventions neurocognitives pour renforcer ses capacités personnelles ou compenser un trouble induit par une maladie neuropsychiatrique. Les bénéfices attendus peuvent être majeurs tant sur le plan individuel que sociétal.

Avant toute chose, il est nécessaire de définir ce qu'est un problème. Un **problème** correspond classiquement à une question à résoudre dans un domaine quelconque, qui se présente avec un certain nombre de difficultés ou d'obstacles. Il se caractérise par une **situation initiale** (i.e., l'énoncé), un **objectif** à atteindre (i.e., la solution) et des **moyens pour atteindre ces objectifs** (i.e., des règles valides). Le problème prend naissance dans la dualité entre une situation initiale et l'objectif à atteindre. Certains problèmes apparaissent plus difficiles à résoudre que d'autres car leur énoncé ne permet pas d'accéder à une

représentation initiale évidente du problème ou parce qu'il n'existe pas de règles préétablies conduisant directement et facilement à la solution. Ces problèmes mal définis (« *ill defined problem* ») conduisent souvent à produire une représentation initiale de l'énoncé insuffisante pour résoudre le problème ou pouvant parfois orienter vers de fausses pistes. Ils nécessitent de penser le problème de manière nouvelle et originale, tout en restant en adéquation avec l'objectif. En somme, ces problèmes requièrent de la **créativité**. Prenons un exemple :

*« Zoé lance un caillou qui atterrit dans le ciel.
Comment est-ce possible et dans quel contexte ? »²*

Dans cette énigme, le problème réside dans la combinaison étonnante et en apparence contradictoire du mot « *atterrir* » et « *ciel* ». En se représentant le ciel de manière conventionnelle (il est bleu avec des nuages, en hauteur, les avions et les oiseaux y volent, ...), on peut générer des idées. Par exemple, qu'il n'y ait plus de gravité, que le caillou atterrisse sur un oiseau qui vole dans le ciel, ou encore que Zoé soit tout simplement en train de rêver. Ces réponses ne sont pas entièrement satisfaisantes pour expliquer l'incongruité de la situation, ou en tout cas il existe une explication plus directe. Mais alors, **quels sont les mécanismes cognitifs permettant d'accéder à la solution de ce problème ?** Pour accéder à cette solution, il est nécessaire de restructurer la représentation mentale du problème, c'est à dire réorganiser les associations d'idées relatives au problème. Cette **restructuration** permet de se représenter le ciel d'une autre manière en l'associant à des concepts éloignés ou inhabituels (c'est un dessin sur le sol, avec des chiffres, on peut sauter dedans et jeter un caillou dessus, ...). Dans une première étude, nous proposons de tester l'hypothèse selon laquelle **la restructuration de nos associations sémantiques aide à résoudre des problèmes**. Pour cela, nous avons utilisé une méthode originale basée sur les réseaux sémantiques afin de quantifier les changements qui s'opèrent dans la représentation mentale du problème et les associations sémantiques en rapport. Dans une deuxième étude, nous proposons d'explorer les corrélats neuronaux associés à la création et la combinaison d'éléments éloignés dans notre mémoire sémantique.

² Solution : Zoé joue à la marelle.

Une alternative pour résoudre ce problème consisterait à utiliser une situation familière, comme un problème déjà rencontré auparavant dont on connaît la solution. Prenons par exemple l'énigme de la voiture :

*« Un homme pousse sa voiture et s'arrête devant un hôtel.
Il se sait alors totalement ruiné. Pourquoi ? »*

Tout comme l'énigme de Zoé, pour résoudre cette énigme, il faut pouvoir représenter le problème de manière différente. Ici, l'homme ne pousse pas une voiture en panne, mais un pion ; il n'arrive pas devant un hôtel 5 étoiles très cher ou un hôtel en feu dont il est le propriétaire, mais sur une case qui appartient à son adversaire. Vous l'aurez deviné, l'homme joue au célèbre jeu *Monopoly* et va devoir donner tout son argent car il s'est arrêté sur une case où son adversaire possède un hôtel. Mais cette énigme présente également un lien avec celle de Zoé : dans les deux énigmes, les éléments du problème font évoquer des situations de vie réelle qui doivent être transposées dans un contexte de jeu pour trouver la solution. En effet, ces deux énigmes présentent une relation d'**analogie**. En connaissant l'énigme de la voiture, on peut extraire un principe général qui pourrait aider à résoudre des énigmes analogues. Par exemple ici, on peut appliquer ce principe général à l'énigme de Zoé pour trouver la solution : c'est le **transfert par analogie** où le principe général est appelé schéma analogique. L'analogie se présente donc comme un moyen de résoudre un problème. Mais **comment est formé le schéma de l'analogie ? Comment capturer cette capacité cognitive de transfert par analogie ? Quel lien existe-t-il entre la créativité et le raisonnement par analogie ?** Au cours de différentes expériences, nous proposons de répondre à ces questions en explorant le **lien entre transfert par analogie et résolution de problèmes créatifs** et en validant une nouvelle tâche expérimentale capturant des capacités individuelles de transfert par analogie. Enfin par la quantification des processus de restructuration par les réseaux sémantiques, nous proposons d'explorer de nouvelles hypothèses pour expliquer la formation du schéma analogique dans le transfert par analogie.

Si vous n'aviez pas immédiatement trouvé la solution à l'énigme de Zoé, peut-être qu'une sieste vous y aurait aidé ... L'incubation est décrite comme une étape importante du processus de résolution de problème en créativité. Elle correspond à une période au cours de laquelle nous sommes occupés à autre chose que réfléchir au problème irrésolu qui nous

préoccupe. Nombreuses sont les histoires surprenantes rapportées par d'éminents scientifiques expliquant comment ils ont résolu un grand problème de leur époque au cours d'une sieste, d'une nuit ou d'un rêve. Plusieurs modèles théoriques mettent en avant le sommeil, et en particulier le **sommeil paradoxal**, comme facteur facilitant la réorganisation de nos associations d'idées et en conséquence la résolution de problèmes. Pourtant, peu de preuves expérimentales directes permettent aujourd'hui de confirmer cette intuition et d'en comprendre les mécanismes. **Le sommeil est-il réellement un facteur facilitant la résolution de problème ? Si oui, par quels mécanismes celui-ci l'impact-t-il ?** Ces dernières questions font l'objet d'une étude expérimentale spécifique dans laquelle nous examinons le **rôle de différents stades du sommeil dans les processus de restructuration et les capacités de résolution de problèmes créatifs**.

Au total, pour apporter des réponses aux questions soulevées ci-dessus, nous avons exploré **les mécanismes cognitifs et corrélats neuronaux associés à la résolution de problèmes en créativité**, mais également **les facteurs pouvant moduler notre capacité à résoudre des problèmes**. Pour aborder ces questions, nous avons utilisé les concepts théoriques et expérimentaux des neurosciences de la **créativité** et du **raisonnement par analogie**, combinés aux **sciences des réseaux** (graphes) et aux neurosciences du **sommeil**. Dans cette introduction, nous détaillons successivement ce qu'est la créativité et le raisonnement par analogie à travers leurs différents axes de recherche actuels en neurosciences. Nous développons ensuite comment des mécanismes spécifiques impliqués dans la créativité et le raisonnement par analogie peuvent s'intégrer dans la résolution de problèmes. Puis, nous introduisons la théorie des graphes et les réseaux sémantiques qui se présentent comme une méthodologie originale pour explorer ces mécanismes expérimentalement. Enfin, nous exposons les différents modèles théoriques et données expérimentales qui pointent le sommeil comme potentiel modulateur de la résolution de problèmes, et décrivent sur quel(s) mécanisme(s) il pourrait agir.

Partie 1

Les neurosciences de la créativité

« Qu'il s'agisse d'un bloc de grès surplombant ou de la démonstration d'un théorème improbable, les problèmes que Gill [John] préfère sont les problèmes non résolus [...]. Pour les grimpeurs de blocs ambitieux, tout comme pour les mathématiciens ambitieux [...] il ne suffit pas de résoudre un problème particulier [...]. Dans les deux cas, il s'agit de parvenir à un résultat intéressant – l'idéal est un résultat inattendu – d'une manière élégante, en procédant avec facilité, avec une surprenante simplicité. C'est en cela que réside le style [...]. **Pour devenir grimpeur de blocs ou un chercheur en mathématiques, il faut posséder cette inclinaison naturelle à creuser un problème, cette forte incitation intérieure à aller au-delà, à découvrir du nouveau.** Dans l'une ou l'autre activité, la récompense de cet effort est un progrès personnel presque continue, et c'est enthousiasmant. »

Propos de Gill John – Mathématicien et grimpeur
Passage de Jon Krakauer
Rêves de montagnes, 1990

Sommaire	p.
1.1 Comment définir la créativité ?	24
1.2 Comment étudier la créativité ?	25
1.3 Un cerveau créatif	29
Corrélat neuronal de la créativité	
L'apport des études de patients cérébrolésés dans les neurosciences de la créativité	
Décours temporel de la pensée créative	
Synthèse	39

Dans cette première partie d'introduction, nous proposons de développer les avancées scientifiques dans le domaine des neurosciences de la créativité. Pour cela, nous détaillons successivement les concepts théoriques, les applications expérimentales et les bases cérébrales associées à la pensée créative.

1.1 Comment définir la créativité ?

La **créativité** se définit de manière consensuelle en neuroscience comme la **capacité à réaliser une production ou une idée à la fois originale (unique, nouvelle, inattendue) et appropriée à un contexte (utile, adaptée, adéquate)** (Lubart et al., 2013; Sternberg, 1999). Cette définition s'adapte au caractère pluridisciplinaire de la créativité qui peut s'exprimer dans une multitude de domaines d'activités humaines tels que les découvertes scientifiques, les inventions technologiques, la production artistique ou plus généralement la résolution de problèmes (Lubart et al., 2015; Weisberg, 2006). La créativité est multidimensionnelle et dépend de nombreux facteurs. Par exemple, la créativité repose sur des opérations mentales, elle peut être affectée par nos émotions (Davis, 2009), notre motivation (Amabile, 1983; Amabile et al., 2018; Benedek et al., 2020; Fischer et al., 2019), notre environnement (Amabile & Pillemer, 2012; Lubart et al., 2013) ou encore dépendre de certains traits de notre personnalité (Beaty, Chen, et al., 2018; Vartanian et al., 2018). La pandémie de la COVID-19 est une situation inédite qui a permis d'illustrer l'impact de ces dimensions sur nos comportements créatifs. Cette situation sans précédent a bouleversé nos conditions de vie personnelle et professionnelle en nous imposant de nouveaux problèmes auxquels nous avons tous dû faire face. Cet événement a été une opportunité unique pour étudier les facteurs qui peuvent exalter ou au contraire freiner notre créativité dans des conditions écologiques (Karwowski et al., 2021; Lopez-Persem, Bieth, et al., 2022; Mercier et al., 2021). Dans une étude à laquelle j'ai activement participé (**ANNEXE 1**), nous avons pu montrer que malgré un vécu subjectif négatif du confinement, les comportements créatifs (évalués de manière subjective et objective) se sont en moyenne majorés pendant le premier confinement en France. Cette exaltation était en lien avec l'augmentation du temps libre et le sentiment de bien-être. Au contraire, la diminution des comportements créatifs était en lien avec des facteurs émotionnels négatifs (Lopez-Persem, Bieth, et al., 2022).

La question qui nous intéresse dans cette thèse est de comprendre certains des processus cognitifs ou opérations mentales qui permettent d'être créatif et qui peuvent être reliées à des profils d'activités cérébrales spécifiques (Volle, 2017).

1.2 Comment étudier la créativité ?

Plusieurs approches expérimentales ont été développées pour provoquer et capturer la cognition créative (Lubart et al., 2013). Ces différentes approches se basent sur des théories cognitives de la créativité et constituent à ce jour des références solides pour en explorer les mécanismes et corrélats neuronaux sous-jacents. Elles comprennent : la pensée divergente, la combinaison associative et l'insight (**Figure 1**).

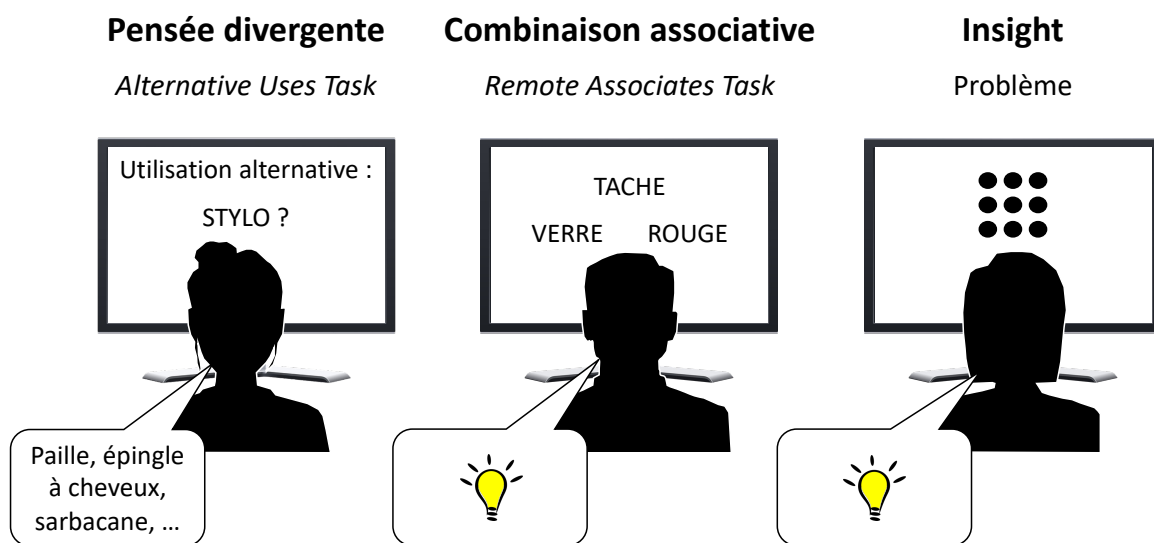


Figure 1. Approches expérimentales pour étudier la cognition créative. Représentation schématique des trois principales approches pour étudier les capacités créatives, illustrées par un exemple concret de tâche expérimentale³. Figure adaptée de Bieth et al., 2021.

La **pensée divergente** constitue une des approches les plus utilisées dans l'étude de la créativité. Elle repose sur l'hypothèse selon laquelle la créativité dépend de la **capacité à générer une multitude d'idées à un problème qui n'a pas de bonnes ou mauvaises réponses** (Guilford, 1950, 1967). Ainsi être créatif correspond à la capacité à générer des idées différentes et originales. La tâche la plus courante est celle de l'*Alternative Uses Task* (**Figure 1**) (Torrance, 1972). Dans cette tâche, il est demandé de trouver le plus d'utilisations alternatives, originales, à un objet courant. Les capacités de créativité sont évaluées à partir

³ Réponse à la *Remote Associates Task* : VIN
Réponse au problème des 9 points :



de scores reflétant la fluence idéatoire (quantité de réponses différentes données), l'originalité (approximée par la fréquence de la réponse au sein d'un panel de participants ou par une évaluation subjective), ou encore la flexibilité (nombre de catégories de réponse explorées) (Reiter-Palmon et al., 2019). D'autres tâches de pensée divergente utilisant un matériel figural existent également, par exemple les tâches de complétion de figures incomplètes de Barbot et al. (Barbot, 2018), des sous-tâches de l'Évaluation du Potentiel Créatif (EPoC) (Lubart et al., 2011), ou encore du test de Torrance (Torrance, 1972). Même si un effort est réalisé par la communauté des sciences cognitives de la créativité pour homogénéiser le traitement de ces tâches, la définition et le calcul des différents scores restent encore hétérogènes (Barbot, 2018; Beaty et al., 2022; Silvia et al., 2008).

Dans la **combinaison associative**, développée à partir de la théorie associative de Mednick, être créatif relève de la **capacité à combiner des éléments qui n'ont pas de liens évidents entre eux afin d'en créer un nouveau qui soit utile et adapté au contexte** (M. T. Mednick et al., 1964; S. A. Mednick, 1962). Plus les éléments à combiner sont éloignés, plus il est nécessaire de mettre en jeu des processus créatifs pour les relier. Cette approche est étroitement en lien avec le rôle des associations sémantiques en mémoire dans la créativité. En effet, selon cette théorie associative, une personne plus créative présenterait une organisation de sa mémoire sémantique offrant une plus grande flexibilité mentale dans ses associations d'idées (Benedek & Neubauer, 2013; S. A. Mednick, 1962). L'organisation des associations d'idées suivrait une hiérarchie plus « plate » chez les individus présentant un potentiel créatif élevé, leur permettant d'accéder à des associations moins communes. Une hiérarchie « plate » fait référence à un mode d'associations de mots où aucune réponse n'apparaît prépondérante par rapport à une autre (Y. N. Kenett et al., 2014; M. T. Mednick et al., 1964; S. A. Mednick, 1962) (**Figure 2**). Ainsi, un sujet créatif présenterait une fluence d'idées initiale faible (car aucune réponse n'est dominante dans sa hiérarchie) mais prolongée dans le temps (forte fluence associative) permettant l'émergence de mots non communs (avec une faible force d'association) (Benedek & Neubauer, 2013; M. T. Mednick et al., 1964; S. A. Mednick, 1962). Cet état permettrait de faire des liens entre des concepts plus éloignés.

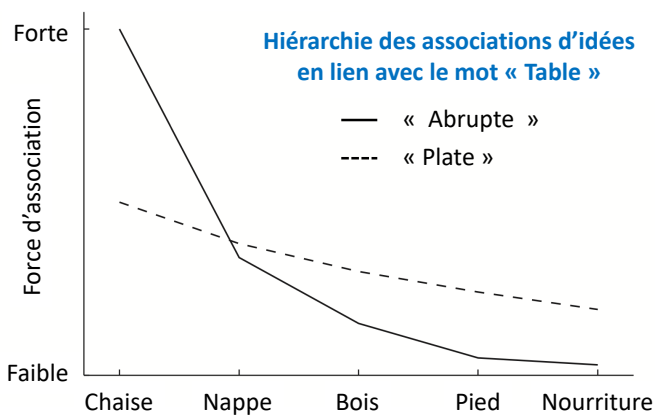


Figure 2. Hiérarchie des associations d'idées. Profil d'individu avec une hiérarchie « plate » (courbe pointillée) et « abrupte » (courbe pleine) dans les associations d'idées en réponse au mot « table ». La différence entre la force d'association du premier et du deuxième associés permet de distinguer ces deux profils. Figure adaptée de Benedek & Neubauer, 2013.

La tâche principale explorant la créativité selon cette approche est la *Remote Associates Task* (**Figure 1**). Dans cette tâche, il est demandé au sujet de trouver un mot qui relie d'une manière ou d'une autre trois mots indices qui n'ont pas de lien évident entre eux. Dans le laboratoire d'accueil, nous avons développé une adaptation de cette tâche : la *Combined Associates Task* (CAT) (Bendetowicz et al., 2017, 2018). La nouveauté de cette adaptation est la possibilité de contrôler la force d'association (représentée par la distance sémantique) qui sépare les mots indices de la solution attendue. Cette tâche comprend alors des essais « distants » où les éléments à associer sont sémantiquement éloignés de la solution, et des essais « proches » où les éléments à associer sont sémantiquement proches. Cette distinction originale a permis de tester directement et confirmer l'hypothèse de Mednick : plus les mots à combiner sont éloignés (essais « distants »), plus les performances de résolution de ces essais étaient corrélées positivement à d'autres critères d'évaluation de la créativité (Bendetowicz et al., 2017, 2018). D'autres adaptations de la tâche de Mednick ont également été développées afin de proposer des versions non verbales (Becker & Cabeza, 2022; Oltețeanu & Zunjani, 2020). J'ai développé dans mon laboratoire d'accueil une adaptation de ce type à partir de photos qui est en cours de validation et ne sera pas décrite dans cette thèse.

Enfin, la **résolution de problèmes avec insight** constitue la troisième approche principale d'étude de la créativité. La résolution avec insight est **associée à une expérience subjective plus ou moins intense connue sous le nom de « Eurêka ! »** (Kounios & Beeman, 2014; Sprugnoli et al., 2017). De nombreuses anecdotes (vraies ou pas) ou expériences

rapportées par d'éminents chercheurs illustrent les caractéristiques de ce phénomène. Celui-ci correspond au moment où la **solution survient de manière très soudaine, comme une illumination, sans que la personne puisse expliquer les étapes ayant conduit à cette solution.** On pense par exemple à l'histoire de Newton adossé à un arbre qui découvre soudainement les lois de la gravité en visualisant une pomme tomber. De plus, ce phénomène est souvent associé à une émotion positive forte et un sentiment de confiance, à l'image d'Archimède quittant sa baignoire sans s'habiller pour annoncer dans les rues de Syracuse sa découverte sur les principes des corps plongés dans un liquide. Classiquement, la résolution de problèmes par insight s'oppose à une approche analytique, au cours de laquelle des hypothèses sont formulées pendant notre raisonnement afin de nous diriger progressivement vers la solution. Aujourd'hui, le phénomène de Eurêka constitue le témoin d'une résolution de problèmes avec insight (Bowden et al., 2005; Kounios & Beeman, 2014; Sprugnoli et al., 2017; Topolinski & Reber, 2010; Weisberg, 2013). La résolution de problèmes avec insight serait pour de nombreux auteurs une méthode de résolution particulière et en lien avec un processus créatif, puisqu'elle permet de générer des idées inattendues et originales (Chu & MacGregor, 2011; Sprugnoli et al., 2017). Ce point est confirmé par plusieurs études expérimentales adressant directement la question de ce lien (Dietrich, 2004; Kounios & Beeman, 2014).

Certains problèmes sont particulièrement connus pour susciter un Eurêka lors de leur résolution. Ces problèmes peuvent être visuels (problème des neuf points, **Figure 1**), verbaux (comme des anagrammes) ou encore mathématiques (problème des allumettes dans lequel il faut changer de place une allumette afin de rétablir la véracité d'une équation mathématique). La *Remote Associates Task*, présentée précédemment, est un autre exemple de problème verbal souvent résolu par un Eurêka. Cette tâche constitue probablement à ce jour l'un des paradigmes les plus utilisés en neurosciences pour comprendre les mécanismes et corrélats neuronaux associés à la résolution de problèmes avec insight (C.-L. Wu et al., 2020). La principale limite de ce paradigme réside dans la méthode utilisée pour définir une résolution avec insight. Actuellement, le rapport subjectif d'une expérience de Eurêka pendant la résolution d'un problème est la mesure communément utilisée et validée pour définir et étudier l'insight (Laukkonen & Tangen, 2018). Cependant le développement de méthodes plus objectives pour mieux capturer l'insight et ses mécanismes neuronaux reste une question ouverte.

Ainsi, l'utilisation des différentes approches expérimentales décrites ci-dessus permet d'établir des scores indicatifs des capacités individuelles de créativité selon plusieurs aspects. Elles ouvrent les portes à l'étude des mécanismes et corrélats neuronaux associés à la pensée créative.

1.3 Un cerveau créatif

Corrélats neuronaux de la créativité

Le développement de tâches expérimentales de créativité combiné à l'essor des techniques de neuroimagerie a permis de construire des hypothèses fortes concernant les corrélats cérébraux associés à la pensée créative (Boccia et al., 2015; Cogdell-Brooke et al., 2020; Gonen-Yaacovi et al., 2013; Kuang et al., 2022; Pidgeon et al., 2016; W. Shen et al., 2016, 2018; Sprugnoli et al., 2017; X. Wu et al., 2015). En particulier, la connectivité fonctionnelle permet aujourd'hui de décrire des réseaux cérébraux impliqués dans la créativité. Ces réseaux sont constitués de régions cérébrales qui s'activent de manière conjointe dans le temps. Ainsi les études de neuroimagerie conduites chez des sujets sains ont permis d'identifier trois réseaux principaux impliqués dans la créativité, indépendamment de la tâche utilisée : le réseau du mode par défaut, le réseau de contrôle et le réseau de saillance.

Le **réseau du mode par défaut** est constitué de plusieurs régions cérébrales s'organisant en trois modules : un système central incluant le cortex préfrontal antéro-médial et le précunéus ; un système temporal médian correspondant au cortex préfrontal ventro-médial, l'hippocampe et le cortex parahippocampique ; et un système dorso-médial regroupant le gyrus temporal moyen, le gyrus angulaire et le cortex préfrontal dorso-médial (Andrews-Hanna et al., 2014; B. T. T. Yeo et al., 2011). Des études ont montré que ce réseau est impliqué dans la cognition spontanée, l'état de rêverie éveillée ou de vagabondage de la pensée et de pensées tournées vers soi (Andrews-Hanna et al., 2010; Christoff et al., 2016; Raichle, 2015). **Dans la créativité, ce réseau permettrait de générer des pensées de manière spontanée, libres de toute contrainte** (Benedek et al., 2018; Christoff et al., 2016; Marron et al., 2018) par association d'idées présentes en mémoire (Benedek, Kenett, & Umdasch, 2017; Benedek & Jauk, 2018; Y. N. Kenett et al., 2014; S. A. Mednick, 1962).

Le **réseau de contrôle** est un réseau impliqué dans les fonctions exécutives de contrôle, incluant la mémoire de travail, l'inhibition, le contrôle attentionnel, le rappel en mémoire, la planification ou encore la flexibilité mentale. Il est composé principalement du cortex préfrontal dorso-latéral, du cortex pariétal postérieur, du cortex cingulaire antérieur et dorsal et de la partie postérieure du lobe temporal incluant la jonction temporo-pariétale (Power & Petersen, 2013; B. T. T. Yeo et al., 2011). Dans la créativité, ces processus de contrôle sont impliqués dans l'inhibition de réponses évidentes ou inappropriées, dans la manipulation des informations et représentations en mémoire, dans le contrôle du rappel en mémoire et dans l'évaluation et la sélection d'une réponse que l'on juge la plus créative ou que l'on préfère (Beaty et al., 2017; Benedek & Jauk, 2018; Cassotti et al., 2016; De Dreu et al., 2012; Edl et al., 2014; Ellamil et al., 2012; Lee & Therriault, 2013). Ainsi, lors d'une pensée créative, les processus de contrôle permettraient d'**orienter notre recherche vers des associations d'idées plus éloignées en inhibant les réponses évidentes et guidant le rappel en mémoire**. Ils seraient également impliqués dans le monitoring, l'évaluation et la sélection des idées activées (Lopez-Persem, Rodriguez, et al., 2022).

Les études récentes de connectivité fonctionnelle ont montré que ces deux réseaux interagissaient ensemble lors de tâches de créativité (Beaty et al., 2016, 2017). Un troisième réseau, le **réseau de saillance**, jouerait le rôle de médiateur ou coordinateur dans l'interaction entre réseau de contrôle et réseau du mode par défaut (Jilka et al., 2014; Sridharan et al., 2008). Il regroupe principalement les régions insulaires, le cortex cingulaire antérieur mais également les aires motrices supplémentaires et le cortex préfrontal dorso-latéral (Bressler & Menon, 2010; B. T. T. Yeo et al., 2011). Ce réseau est impliqué dans des tâches impliquant des variations attentionnelles dirigées vers des éléments saillants d'un stimulus externe ou interne (Eckert et al., 2009; Seeley et al., 2007). Appliqué à la créativité, le réseau de saillance **permettrait d'alterner entre des processus associatifs permettant de générer des idées (médiés par le réseau du mode par défaut) et des processus de contrôle permettant d'évaluer et sélectionner une idée (médiés par le réseau de contrôle)** (Beaty et al., 2015) (**Figure 3**). Cette interaction est au cœur des mécanismes cognitifs de la pensée créative (Benedek & Jauk, 2018; Volle, 2017).

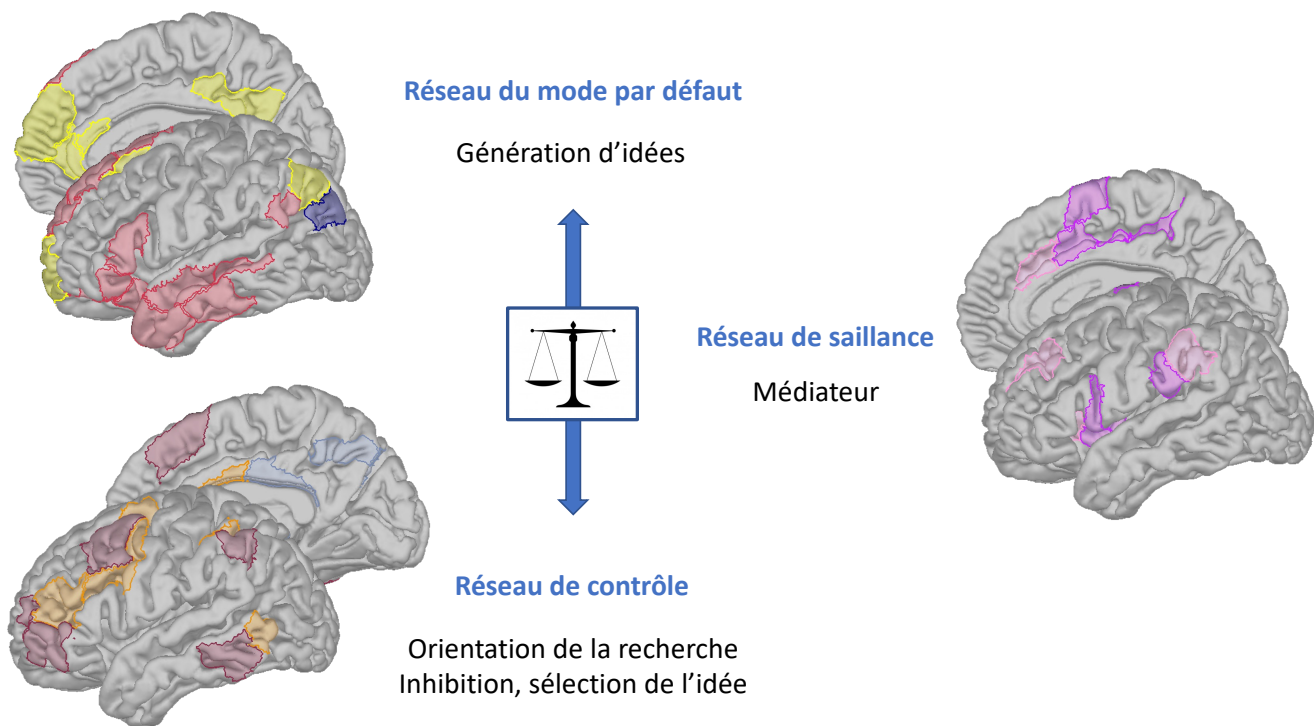


Figure 3. Mécanismes neurocognitifs associés à la pensée créative. Présentation des trois principaux réseaux associés aux tâches de créativité et leurs implications respectives dans la cognition créative. Les régions cérébrales impliquées dans chaque réseau sont représentées en couleur sur des représentations 3D d'un cerveau normalisé selon les coordonnées MNI via le logiciel Brainstorm (Tadel et al., 2011).

Les études en IRM fonctionnelle d'activation ont montré le recrutement de multiples régions cérébrales souvent superposables avec les trois réseaux décrits ci-dessus, et ont tenté d'en comprendre le rôle dans les processus de créativité (Arden et al., 2010; Bieth et al., 2021; Boccia et al., 2015; Cogdell-Brooke et al., 2020; Dietrich & Kanso, 2010; Gonen-Yaacovi et al., 2013; Jung, 2013; Kuang et al., 2022; Pidgeon et al., 2016; W. Shen et al., 2016, 2018; Sprugnoli et al., 2017; X. Wu et al., 2015). Une visualisation schématique des régions retrouvées à travers les différentes études en IRM fonctionnelle est présentée dans la **Figure 4**.

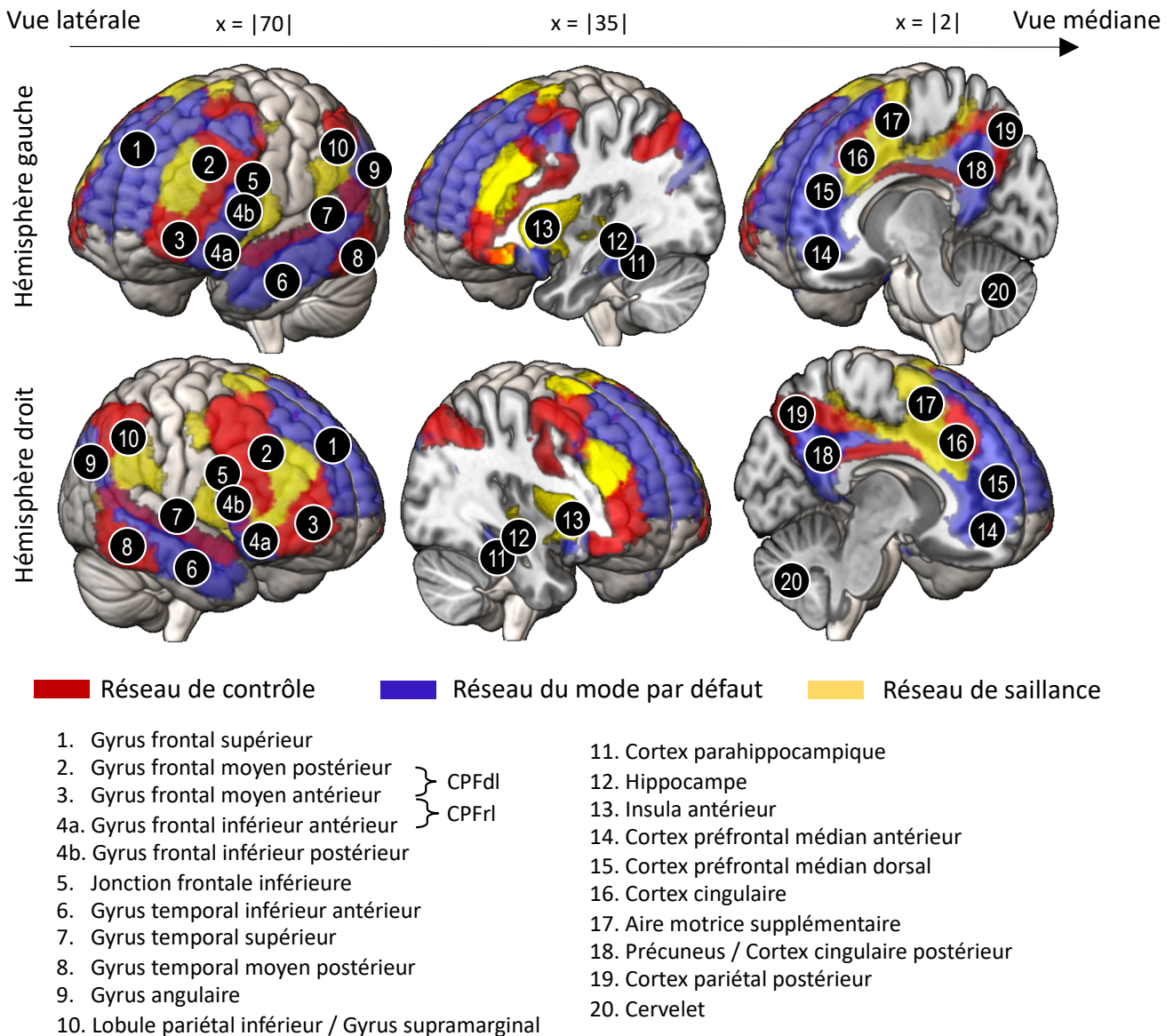


Figure 4. Synthèse des régions cérébrales impliquées dans la créativité. Représentation schématique des principales régions associées à la créativité dans des études de neuroimagerie en IRM fonctionnelle. Chaque région est indiquée par un numéro positionné sur une représentation 3D d'un cerveau normalisé selon les coordonnées MNI. Les trois réseaux principaux impliqués dans la créativité sont représentés en couleur selon l'atlas proposé par Yeo et al., 2011. Figure adaptée de Bieth et al., 2021. CPFdl – cortex préfrontal dorso-latéral, CPFrl – cortex préfrontal rostro-latéral

En particulier, ces études retrouvent de manière consistante l'implication du cortex préfrontal dans la réalisation des différentes tâches expérimentales de créativité, notamment dans sa portion dorso-latérale, rostrale mais également médiane. En plus de ces régions antérieures, d'autres régions postérieures sont associées de manière récurrente à la

performance de tâches de créativité. Elles regroupent différentes régions du lobe pariétal (le précunéus, le gyrus angulaire), du lobe temporal (le pôle temporal, la partie postérieure du gyrus temporal supérieur et moyen, la partie médiane) ou encore de la jonction temporo-pariétale. Si certaines régions sont recrutées pour différents types de tâches, d'autres semblent dépendre du matériel utilisé ou du processus mis en jeu (Gonen-Yaacovi et al., 2013). Ainsi, la combinaison associative semble recruter la partie rostro-latérale du cortex préfrontal mais également la partie inférieure du gyrus frontal inférieur et la partie postérieure du gyrus temporal moyen ; tandis que la pensée divergente est plus en lien avec l'activité de régions préfrontales dorso-latérale postérieure, dorso-médiale et du gyrus supramarginal. Enfin, la résolution de problèmes avec insight est souvent en lien avec l'activation de régions préfrontales (gyrus frontal inférieur, cortex cingulaire antérieur et postérieur), insulaires et temporales (gyri temporaux supérieur et moyen postérieurs, pôles temporaux) (Kuang et al., 2022; W. Shen et al., 2016; Sprugnoli et al., 2017). Contrairement au mythe qui associe le cerveau droit à la créativité et le cerveau gauche au raisonnement logique et analytique, la majorité des méta-analyses montrent que les deux hémisphères sont impliqués dans la créativité. C'est d'ailleurs l'hémisphère gauche qui domine souvent dans les cartes d'activation en IRM fonctionnelle, potentiellement parce que la majorité des tâches utilisées en neuroimagerie repose sur du matériel verbal (traité par l'hémisphère gauche).

L'apport des études de patients cérébrolésés dans les neurosciences de la créativité

Les études de neuroimagerie fonctionnelle citées établissent une corrélation entre une fonction (la créativité) et une activité cérébrale (des réseaux ou aires cérébrales). Ces études n'établissent pas un lien de causalité structure-fonction. L'étude des patients cérébrolésés constitue une manière de surpasser cette limite. En établissant un lien entre une lésion cérébrale et une altération de performance dans une tâche expérimentale, un lien causal peut être approché. Une atteinte cérébrale peut correspondre à une lésion focale (secondaire à un accident vasculaire cérébral ou une tumeur par exemple) ou être plus diffuse respectant alors un pattern anatomique spécifique à une maladie neurologique (atrophie de certaines pathologies neurodégénératives par exemple).

Dans le domaine des neurosciences, très peu d'études ont examiné la créativité après lésion cérébrale, comme en témoignent plusieurs revues de la littérature réalisées dans notre équipe, auxquelles j'ai activement participé (Bieth et al., 2019, 2021; M. P. Ovando-Tellez et al., 2019) (**ANNEXE 2**). Ces revues soulignent principalement que les lésions localisées dans les régions frontales, hippocampiques et à moindre mesure au niveau de la jonction temporo-pariétale sont associées à une altération de performances dans des tâches de créativité, principalement en pensée divergente (voir **Figure 5** pour une visualisation synthétique de ces études). La grande majorité de ces études présentent cependant des limites méthodologiques. Des groupes de patients présentant une localisation lésionnelle commune étaient comparés. Ce type d'approche nécessite un a priori sur la ou les régions critiques, et limite les conclusions à la région testée avec une précision anatomique très faible. Elle est en défaut par exemple si d'autres régions que celle testée sont nécessaires à une fonction, ces régions critiques pouvant alors être endommagées dans le groupe contrôle. De plus, l'impact de ces lésions sur les réseaux cérébraux est peu considéré.

Seulement une étude a proposé une approche permettant en grande partie de dépasser ces limites (Bendetowicz et al., 2018). Cette étude a d'abord exploré les conséquences d'une lésion cérébrale à l'échelle des réseaux cérébraux en évaluant l'impact d'une déconnexion d'un réseau par une lésion sur les performances de créativité. Les auteurs ont pu observer que les lésions à l'origine d'une déconnexion du réseau du mode par défaut et de contrôle étaient associées à une altération de performance à la CAT. De plus, les auteurs ont montré par une méthode de *mapping lésion-déficit* (voxel à voxel) qu'une altération de performance à cette tâche était associée soit à une lésion du cortex préfrontal rostro-médial droite (appartenant au réseau du mode par défaut), soit une lésion dans le cortex préfrontal rostro-latéral gauche (appartenant au réseau de contrôle). Dans la première localisation (rostro-médiale droite), en plus de présenter un déficit à la CAT, les patients présentaient également un déficit à produire des associations d'idées éloignées en réponse à un mot dans une tâche additionnelle de génération d'associés. En revanche, cette capacité à générer des associations d'idées éloignées était préservée chez les patients présentant une lésion rostro-latérale gauche. Cette dissociation a permis d'établir des hypothèses mécanistiques forte dans la combinaison associative : la région préfrontale rostro-médiale droite (appartenant au réseau du mode par défaut) semble impliquée dans la capacité à générer des associations

d'idées éloignées (qui est un prérequis pour résoudre une CAT), alors que la région préfrontale rostro-latérale gauche semble intervenir dans l'étape d'intégration et de combinaison des associations générées pour trouver la solution.

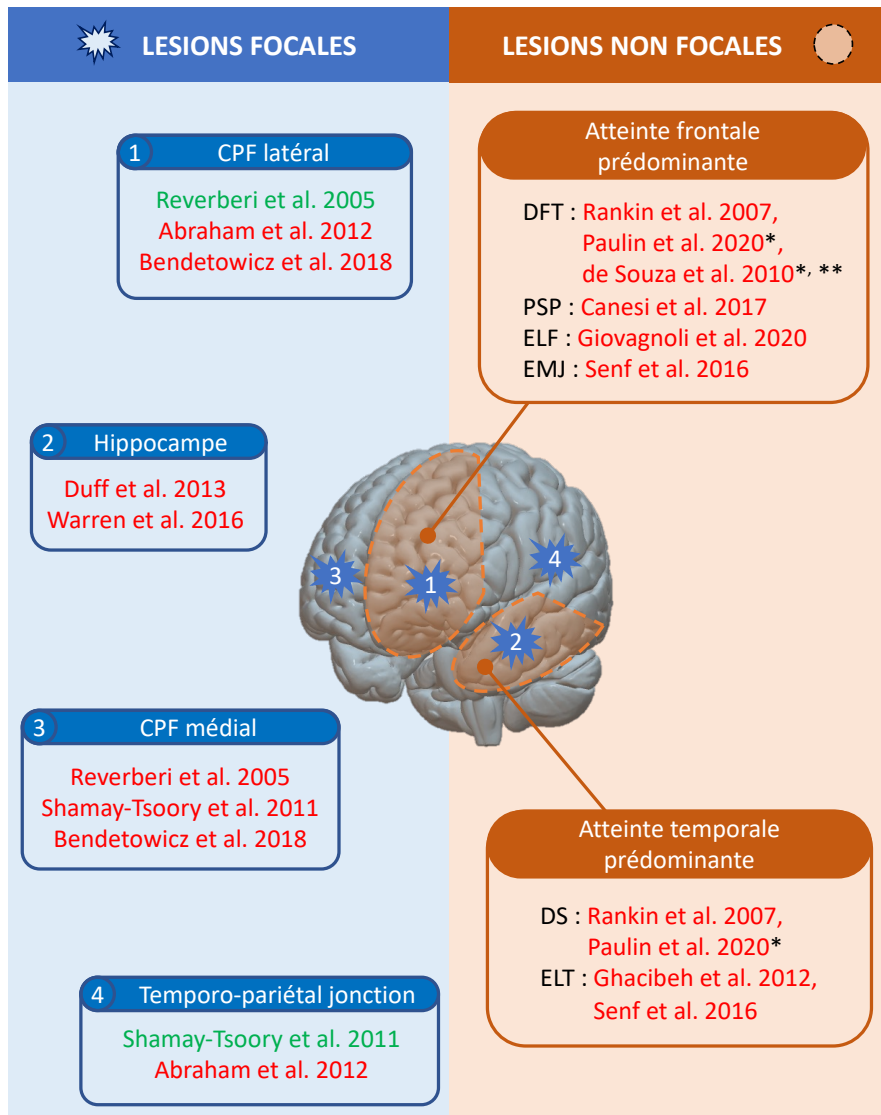


Figure 5. Synthèse des études lésionnelles étudiant la cognition créative.

Représentation schématique des études reliant performances de créativité à des lésions anatomiques focales identifiées en neuroimagerie (en bleu) et à des lésions plus diffuses en rapport avec certaines maladies neurologiques (en orange). La couleur des références indique si la lésion est associée à un déficit (en rouge) ou un gain (en vert) de créativité. Figure adaptée de Bieth et al., 2021.

* : patients souffrant de pathologies neurologiques utilisant également des méthodes de neuroimagerie.

** : cette étude retrouve également un lien avec l'atteinte de régions pariétales, temporales et temporo-pariétales.

CPF – cortex préfrontal, DFT – démence fronto-temporale, PSP – paralysie progressive supra nucléaire, ELF – épilepsie du lobe frontale, DS – démence sémantique, ELT – épilepsie du lobe temporel, EMJ – épilepsie myoclonique juvénile.

Parmi les études lésionnelles, certaines ont suggéré qu'une lésion dans les régions temporo-pariétale postérieure ou frontale latérale gauche était à l'origine d'une augmentation de performance à des tâches de créativité (Reverberi et al., 2005; Shamay-Tsoory et al., 2011). Bien que non répliqués, ces résultats sont concordants avec des études utilisant la stimulation transcrânienne (principalement par stimulation à courant direct). Cette méthode permet par excitation ou inhibition d'une région cérébrale chez un sujet sain d'induire des modifications de performances de manière transitoire, sans induire de lésion

cérébrale. Cette méthode offre la possibilité d'explorer un lien structure-fonction plus causal, à l'image des études des patients cérébrolésés. Quelques études ont ainsi rapporté qu'une inhibition du cortex préfrontal (Chrysikou et al., 2013, 2021; Kleinmintz et al., 2018; Luft et al., 2017) était associée à des meilleures performances dans des tâches de pensée divergente ou de résolution de problèmes (voir Weinberger et al., 2017 pour une revue de la littérature). Ces éléments ne sont pas sans rappeler les quelques cas rapportés de patients présentant une exaltation de leur créativité artistique dans le cadre d'une pathologie neurodégénérative touchant le lobe frontal (de Souza et al., 2014). Cependant, l'étude plus rigoureuse de ces cas n'a pas permis de confirmer ce lien (d'un point de vue cognitif) et la grande majorité des études ayant étudié la créativité chez des patients cérébrolésés de façon contrôlée s'accordent pour rapporter un déficit (Bieth et al., 2019, 2021; M. P. Ovando-Tellez et al., 2019). Ces quelques résultats contradictoires pourraient être liés à une imprécision anatomique concernant les régions étudiées étant donné l'hétérogénéité fonctionnelle et de connectivité du cortex préfrontal (Foulon et al., 2018; Thiebaut de Schotten et al., 2017).

Décours temporel de la pensée créative

Toutes ces données permettent d'établir des hypothèses fortes sur les bases cérébrales associées à la pensée créative. Cependant la faible résolution temporelle de ces approches ne permet pas de décrire le décours temporel des activations cérébrales au cours d'une production créative. Les méthodes électrophysiologiques comme l'EEG offrent l'opportunité d'explorer cette dynamique d'activité cérébrale pendant une tâche de créativité. De plus, elle constitue une méthodologie particulièrement pertinente pour étudier la résolution de problèmes avec insight. En effet, sa haute résolution temporelle est adaptée pour capturer la soudaineté du phénomène de Eurêka.

Paradoxalement, relativement peu d'études ont exploré les variations oscillatoires pendant la production d'idées créatives (Dietrich & Kanso, 2010; Sprugnoli et al., 2017). Leurs conclusions restent mitigées en raison d'une grande disparité dans les paradigmes expérimentaux utilisés mais également dans les méthodes de traitement et d'analyse du signal. De plus, la plupart n'ont pas tiré parti de la haute résolution temporelle de l'EEG en réduisant la dimension de temps dans les analyses. Parmi ces rares études, une augmentation

d'amplitudes oscillatoires dans les rythmes alpha (8-12 Hz), notamment dans les régions frontales et pariétales prédominant à gauche, a été décrite de manière reproductible (Fink et al., 2009; Fink & Benedek, 2014; Fink & Neubauer, 2006; Jauk et al., 2012; Jung-Beeman et al., 2004; Luft et al., 2018; Mastria et al., 2021; Mölle et al., 1996; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Shemyakina et al., 2007; Zhou et al., 2018). L'implication des rythmes alpha dans la créativité a été interprétée comme un processus d'inhibition active de stimuli externes non pertinents (Klimesch, 2012; Klimesch et al., 2007) permettant d'induire des modifications attentionnelles orientées vers ses pensées (Cona et al., 2020; Cooper et al., 2006) et d'augmenter le traitement d'information interne (Fink & Benedek, 2014; Lustenberger et al., 2015). D'autres études ont étudié l'activité cérébrale précédant la résolution d'un problème avec un phénomène de Eurêka. Une étude princeps a montré qu'une *Remote Associates Task* résolue avec un Eurêka (comparativement à celles résolues sans Eurêka) présentait un pattern de variations oscillatoires comprenant : une synchronisation dans les rythmes alpha (10 Hz) dans la région pariéto-occipital droite précédant de 1,4 seconde la réponse, suivie d'une décharge gamma (39 Hz) localisée dans le gyrus temporal supérieur antérieur droit précédant de 0,3 s la réponse (Jung-Beeman et al., 2004) (**Figure 6**). L'implication des rythmes alpha et gamma a été retrouvé dans d'autres études portant sur la résolution de problèmes avec insight en utilisant la *Remote Associates Task* (Luft et al., 2018; Sandkühler & Bhattacharya, 2008), la résolution d'anagrammes (Oh et al., 2020), d'énigmes verbales (Sheth et al., 2009) ou spatiales (Rosen & Reiner, 2016). Enfin, les études ayant étudié la connectivité cérébrale en EEG au cours de tâches expérimentales de créativité sont rares. Elles ont été réalisées au niveau des électrodes (i.e., sans reconstruction de source) limitant drastiquement l'interprétation des résultats tant à l'échelle des régions cérébrales activées que des réseaux cérébraux. Deux études ont montré une augmentation de synchronisation oscillatoire dans les rythmes bêta (18-30 Hz) de manière diffuse à travers l'ensemble des électrodes au cours de la résolution d'une *Remote Associates Task* (Danko et al., 2009; Razumnikova, 2007). Une autre étude a montré une synchronisation oscillatoire plus importante dans les rythmes alpha (8-12 Hz) au cours d'une tâche de créativité (énigmes sous la forme d'anagrammes chinois) entre les électrodes temporales et frontales mais également temporales interhémisphériques (Zhou et al., 2018).

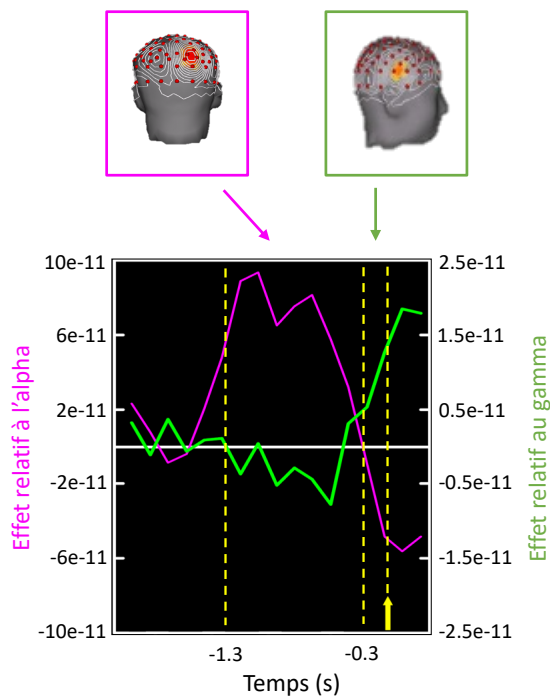


Figure 6. Variations oscillatoires associées à une résolution avec insight (Jung-Beeman et al., 2004). Représentation de la puissance spectrale alpha (9.8Hz, électrode PO8, en violet) et gamma (39 Hz, électrode T8) pour l'effet de résolution avec insight (avec Eurêka – sans Eurêka) en fonction du temps. La flèche jaune indique le moment de la réponse du participant et les lignes pointillées les périodes indiquant un effet significatif. Figure adaptée de Jung-Beeman et al., 2004.

Ainsi, les études EEG constituent une approche complémentaire à l'imagerie IRM pour comprendre les bases neurales de la créativité. Du fait de sa haute résolution temporelle, l'EEG permet d'analyser précisément le déroulement temporel de l'activité cérébrale pendant le processus de créativité. Cet aspect a été sous-exploité à ce jour dans le champ des neurosciences de la créativité. Les études EEG existantes ont associé la résolution de problèmes créatifs à des oscillations alpha en particulier dans les électrodes fronto-pariétales et ont rattaché ces variations à des mécanismes de contrôle ou d'attention tournée vers ses pensées. D'autres ont associé une activité gamma dans différentes régions (frontale ou temporale) à la transformation des représentations mentales. L'analyse de la puissance spectrale au cours du temps pendant une tâche de résolution de problèmes sollicitant l'insight et des changements de représentations mentales permettrait de clarifier l'implication de ces différentes bandes de fréquence au cours du temps et de mieux comprendre les mécanismes impliqués au cours de sa résolution.

Synthèse

Résumé – Les neurosciences de la créativité connaissent depuis plusieurs années des avancées majeures dans la compréhension des facteurs cognitifs impliqués dans la pensée créative. Les progrès techniques des méthodes de neuroimagerie ont permis d’explorer et préciser certains mécanismes cognitifs et leurs bases cérébrales. La description de trois réseaux cérébraux principaux agissant en interaction pour la pensée divergente (Beaty et al., 2016) a permis de repenser les mécanismes de créativité. Certaines données suggèrent que ces mêmes réseaux sont aussi critiques pour la résolution de problèmes (Bendetowicz et al., 2018) dans lesquels générer des solutions alternatives, originales, appropriées est nécessaire.

Questions irrésolues – Cependant, les mécanismes et les bases cérébrales sur lesquels repose la résolution de problèmes créatifs restent peu étudiés et incompris. Beaucoup de travail est encore à réaliser pour clarifier les facteurs neurocognitifs impliqués dans la résolution de problèmes, et surtout comprendre la dynamique d’activation des régions et réseaux cérébraux au cours du temps. Pourtant délaissée dans le domaine au profit d’autres méthodes plus sophistiquées, l’utilisation rigoureuse d’une méthode électrophysiologique permettrait de répondre à cette question.

Partie 2

Le raisonnement par analogie

LE SPHINX : [...] Pourquoi ce cri ? Pourquoi cette face d'épouvanté ? C'était une démonstration, Œdipe, une simple démonstration. Tu es libre.

ŒDIPE : Libre !

ANUBIS : Pardon, Sphinx. Cet homme ne peut sortir d'ici sans subir l'épreuve.

LE SPHINX : Mais ...

ANUBIS : Interroge le ...

ŒDIPE : Mais ...

ANUBIS : Silence ! Interroge cet homme.

LE SPHINX : Je l'interrogerai ... je l'interrogerai ... C'est bon. **Quel est l'animal qui marche sur quatre pattes le matin, sur deux pattes à midi, sur trois pattes le soir ?**

ŒDIPE : L'Homme, parbleu ! Qui se traîne à quatre pattes lorsqu'il est petit, qui marche sur deux pattes lorsqu'il est grand et qui, lorsqu'il est vieux, s'aide avec la troisième patte d'un bâton.

Passage de Jean Cocteau
La machine infernale, 1934

Sommaire	p.
2.1 Principes et applications du raisonnement par analogie	42
2.2 Comment étudier le raisonnement par analogie ?	46
2.3 Neuroimagerie de l'analogie	48
2.4 L'analogie créative	49
Synthèse	50

Il est souvent oublié que dans l'histoire du créatif « Eurêka ! », Archimède a résolu son problème en utilisant un raisonnement par analogie⁴. Il n'est pas rare de trouver dans la littérature des auteurs mentionnant le lien conceptuel existant entre la créativité et le raisonnement par analogie (Green, 2016; Holyoak et al., 1995; Wharton et al., 1996; Yang et

⁴ Le roi Hiéron II de Syracuse aurait demandé à son conseiller scientifique Archimède de vérifier si une couronne d'or était totalement composée d'or ou bien si le métal précieux avait été mélangé avec de l'argent. Archimède ne devait pas endommager la couronne, car elle était destinée à une offrande pour Jupiter, et sa forme ne permettait pas de réaliser un calcul volumique simple. C'est au bain public, en voyant son corps immergé déplaçant un certain volume d'eau qu'il trouva la solution. Utilisant un raisonnement par analogie, il aurait appliqué ce phénomène à la couronne lui permettant ainsi de généraliser une règle connue aujourd'hui sous le nom de poussée d'Archimède.

al., 2022). En effet, ces deux fonctions cognitives de haut degré permettent aux individus d'innover, de s'adapter à de nouvelles situations et de résoudre des problèmes. Malgré ces points communs, analogie et créativité ont très souvent fait l'objet d'explorations indépendantes et peu d'études ont adressé directement leur lien.

Dans cette partie, le raisonnement par analogie est présenté comme une forme de raisonnement de haut niveau, dont l'application ubiquitaire témoigne de son utilité au quotidien. Pour rendre compte de sa complexité, ses différentes étapes mentales sont détaillées et concrétisées à l'aide d'exemples. Les avancées dans le domaine des neurosciences sont présentées pour pleinement discuter ensuite de son lien avec la créativité.

2.1 Principes et applications du raisonnement par analogie

Le raisonnement par **analogie** est une forme de raisonnement relationnel de haut niveau (Gentner & Holyoak, 1997; Krawczyk, 2012). Il permet **l'identification de similarités entre des objets ou des situations en apparence sans lien mais qui partagent une même structure ou schéma**. La similitude s'opère sur les rapports intrinsèques ou l'organisation des éléments constitutifs des objets ou situations comparés. De ce fait, l'analogie dépasse les similarités superficielles entre les éléments de ces objets ou situations. Un exemple populaire est celui de l'énigme du Sphinx⁵, issue la mythologie grecque, que tout voyageur devait résoudre pour pénétrer dans la ville de Thèbes. Dans cette énigme, le Sphinx fait référence à la vie d'un Homme (le bébé marche à quatre pattes, l'adulte marche sur ces deux jambes et le vieillard utilise une canne). Pour répondre et comprendre cette énigme, il est nécessaire d'établir un lien analogique où le bébé, l'adulte et le vieillard sont à une vie ce que le matin, le midi et le soir sont à une journée. Les mots matin, midi et soir présentent plusieurs liens relationnels entre eux à l'échelle d'une journée qu'ils partagent avec les mots bébé, adulte et vieillard à l'échelle d'une vie (un rapport d'ordre chronologique, du temps qui passe, d'un zénith au milieu, d'un début et d'une fin, ...). Dans cet exemple précis, on perçoit bien la puissance du raisonnement par analogie qui permet de faire des liens entre des éléments (bébé/adulte/vieillard et matin/midi/soir) qui ne présentent aucune similarité superficielle entre eux (et qui a sauvé la vie d'Œdipe face au sphinx).

L'analogie est partout autour de nous et son utilisation est quotidienne (Hofstadter & Sander, 2013). Elle permet l'apprentissage par l'extraction de schémas généraux ou de règles abstraites (Gentner & Colhoun, 2010) comme par exemple pouvoir expliquer à des étudiants le système atomique par l'image du système solaire. Le lien analogique permet également de résoudre des problèmes (Cauzinille-Marmèche et al., 1985) à l'image de l'énigme du Sphinx. Son utilisation permet également de faciliter la communication par la génération d'images illustrant un discours en utilisant l'humour, des expressions ou encore des métaphores (Garner, 2005; Gentner & Goldin-Meadow, 2003). Lorsqu'elle présente un haut niveau d'abstraction, l'analogie peut permettre de trouver des similarités entre des éléments de différents domaines qui n'ont en apparence aucun lien. Ainsi, l'analogie peut être créative par

⁵ Cette énigme est présentée au début de ce chapitre dans l'extrait de *La machine infernale* de Jean Cocteau.

la production de liens et la génération de nouvelles idées (Green et al., 2010, 2012; Green, 2016; Green et al., 2017; Holyoak et al., 1995; Wharton et al., 1996; Yang et al., 2022). De nombreux exemples existent pour rendre compte de la pertinence de l'analogie dans nos pensées, notre raisonnement et nos apprentissages (Chaumat et al., 1989). Celui de Platon et Aristote représente bien à quel point l'analogie peut conduire à des pensées créatives. Dans leur traité respectif (*Timée* et *Des parties des animaux*), ils parviennent à décrire l'organisation de la circulation sanguine par l'observation des systèmes d'irrigation des champs. Cette analogie distante permet d'établir des connexions entre des éléments sans liens (pompe/canaux et cœur/vaisseaux) pour extraire une règle générale (i.e., une pompe qui délivre un fluide à différents endroits via des canaux). Ici, l'analogie permet des liens éloignés entre des concepts appartenant à des domaines différents (mécanique et physiologie humaine).

Des théories fondamentales (« *structure mapping theory* », « *multiconstraint theory* »), ont établi différentes étapes (ou processus) dans le raisonnement par analogie (Gentner, 1983; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Holyoak, 1997; Holyoak et al., 1995; Holyoak & Monti, 2021; Holyoak & Morrison, 2012; Markman & Gentner, 2000). Elles rendent compte de la complexité de ce raisonnement dont les mécanismes cognitifs et cérébraux ne sont pas élucidés. Pour expliciter ces différentes étapes, prenons l'exemple de l'analogie entre le système solaire et le système atomique (**Figure 7**). Ici, le système solaire constitue la **source** de l'analogie qui est composée d'éléments (planètes, soleil) présentant des attributs spécifiques. Le système atomique correspond à la **cible** de l'analogie qui est également composée d'éléments (électrons, noyau) présentant aussi des attributs spécifiques. L'analogie consiste donc à **créer des liens relationnels entre les éléments de chaque système et d'établir une similarité entres ces liens** (i.e., des similarités structurelles comme par exemple l'un tourne autour de l'autre). Ces similarités structurelles se produisent qu'il existe ou non des similarités superficielles entre les attributs des éléments des deux systèmes (par exemple, la Terre et l'électron sont très différents et pourtant une analogie peut être faite).

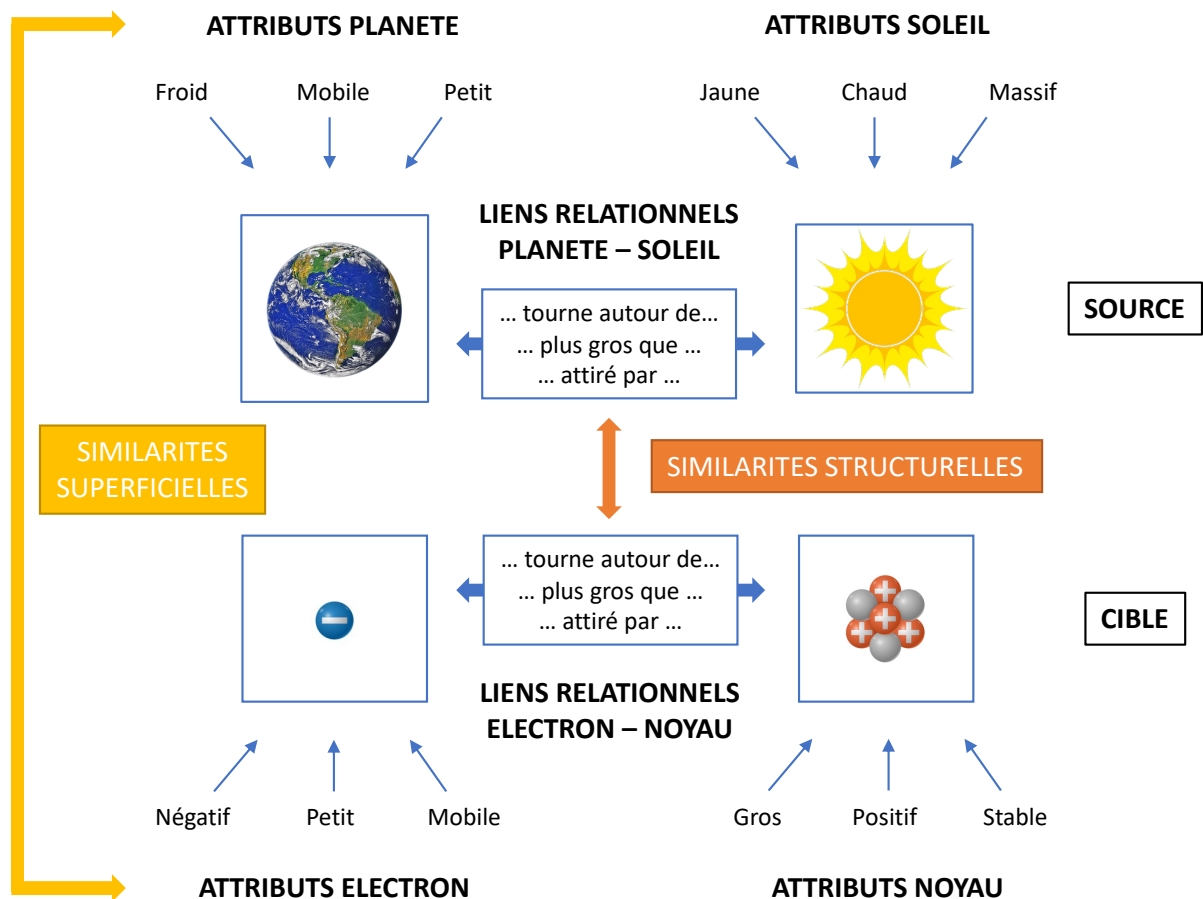


Figure 7. Représentation d’une analogie à travers l’exemple du système solaire et atomique. Les similarités structurelles (en orange) des liens relationnels de chaque système définissent l’analogie. Les similarités superficielles (en jaune) des attributs des éléments peuvent faciliter la détection de similarités structurelles (et donc l’analogie) mais ne sont pas nécessaires.

Ainsi, dans la formation de l’analogie différentes opérations mentales s’opèrent, qui peuvent présenter quelques variations selon les auteurs. On retrouve principalement :

- La première étape consiste à identifier les relations entre les éléments de la source (le système solaire) et de la cible (le système atomique) séparément. Cette étape nécessite donc de se représenter mentalement les attributs des éléments et leur liens respectifs au sein de la source et de la cible.
- La deuxième étape consiste à aligner les représentations de la cible et de la source afin de réaliser un appariement des liens relationnels. Cet appariement se construit sur l’organisation des éléments (e.g., un élément au centre, plusieurs en périphérie) et

leurs types de relations (e.g., l'un tourne autour de l'autre). Cet appariement source/cible permet de projeter les propriétés de la source vers la cible (i.e. de construire des inférences). Cette étape est possible grâce à la détection de **similarités structurelles** (i.e., **des similarités entre les liens relationnels des éléments de la source et de la cible**) (Catrambone, 1997; Gentner et al., 1993; Wharton et al., 1994). Ces similarités structurelles permettent l'étape clef dans la création de l'analogie par la formation d'un **schéma d'analogie**. En effet, la structure commune peut devenir un schéma abstrait qui est appris et pourra être réutilisé ou généralisé à d'autres domaines.

- Dans une troisième étape, l'analogie créée doit faire l'objet d'une validation selon plusieurs critères : (i) la solidité de la cartographie établie et des inférences produites (l'alignement et les inférences produites sont-elles consistantes ?), (ii) les connaissances générales (l'analogie est-elle compatible avec les connaissances actuelles sur les forces physico-chimiques et quantiques) ou encore (iii) la pertinence de l'analogie (est-elle pertinente dans le contexte du problème à résoudre ?) (Gentner & Colhoun, 2010).

Dans la résolution de problèmes, la situation se présente à nous de façon différente. Nous sommes face à un problème nouveau dont la résolution pourrait être facilitée par l'utilisation d'un problème analogue dont nous connaissons la réponse. **L'utilisation d'une situation antérieure familière pour résoudre un problème nouveau** correspond au **transfert par analogie** et suppose des étapes mentales spécifiques en plus de celles décrites précédemment. D'abord, il est nécessaire face au nouveau problème de rappeler et récupérer en mémoire le problème source qui pourrait nous aider dans la résolution du problème : c'est l'évocation analogique. Cette étape est facilitée par la présence de **similarités superficielles**, c'est-à-dire des **similarités directes entre les attributs des éléments de la source et la cible** (le noyau atomique et le soleil sont gros dans leur système respectif, émettent de la chaleur, ...) (Catrambone, 1997; Gentner et al., 1993; Gick & Holyoak, 1980). Le paradoxe est que si les similarités superficielles facilitent l'évocation analogique, ce sont les similarités structurelles qui permettent d'appliquer le schéma analogique et de transférer la solution. De plus, dans les analogies très éloignées, entre des domaines différents, les similarités superficielles font

défaut ou ne sont pas saillantes, limitant le transfert par analogie. Ensuite, afin de pouvoir rendre efficient le transfert par analogie, l'analogie source doit être généralisée. Ces étapes sous-entendent de décontextualiser le schéma d'analogie et de le rendre abstrait (e.g., organisation physique rotationnelle d'éléments). Cette abstraction du schéma analogique peut permettre de restructurer nos associations d'idées par la formation de nouvelles catégories (Gentner, 2005; Sander, 1997; Sander & Richard, 1998) ou de créer des règles générales abstraites (Gentner & Medina, 1998; Sander & Richard, 2005). Selon la théorie de l'alignement progressif (« *progressive alignment* ») (Gentner & Colhoun, 2010), ce processus serait facilité par la répétition de l'abstraction du schéma à partir de plusieurs exemples ou situations. L'abstraction du schéma facilite le transfert par analogie. Du fait de son implication dans les mécanismes d'intérêt de ce travail, le transfert par analogie fait l'objet d'une partie spécifique détaillée plus loin dans le manuscrit.

2.2 Comment étudier le raisonnement par analogie ?

Capturer expérimentalement l'analogie n'est pas simple. Plusieurs tâches utilisant un matériel verbal ont été développées permettant d'explorer le raisonnement par analogie (Ichien et al., 2020). L'approche la plus utilisée est celle des analogies à quatre termes (A :B :: C :D où A est à B ce que C est à D). Dans cette tâche, la réponse demandée peut être le terme D (Green et al., 2012) ou le couple C:D (Popov et al., 2017), en génération spontanée ou sur choix multiples. Les tâches d'analogie à quatre termes ont été également adaptées en figural en utilisant des images d'objets (Krawczyk et al., 2011), des symboles (Boroojerdi et al., 2001; Volle et al., 2010) ou des scénettes (Richland et al., 2006). D'autres approches utilisent des problèmes sous la forme d'énigmes à résoudre (Gick & Holyoak, 1980). Une étude récente a montré que l'analogie pouvait également se produire entre différentes modalités (e.g., entre des mots et un son) (Weinberger et al., 2022).

L'*Analogy task* est une tâche développée dans le laboratoire qui vise à capturer des capacités de raisonnement par analogie (Volle et al., 2010). Cette tâche est détaillée dans cette partie car elle constitue un matériel d'intérêt qui a permis le développement d'une nouvelle tâche expérimentale présentée dans cette thèse. Dans l'*Analogy task*, les participants doivent résoudre plusieurs problèmes sous la forme de courts essais qui

sollicitent un raisonnement par analogie. Cette tâche utilise des stimuli composés de trois éléments se présentant sous différentes formes (lettres, chiffres, figures abstraites) prenant des aspects différents (couleur, nombre, taille, position, remplissage). L'objectif de la tâche est de choisir parmi deux stimuli (les cibles) celui qui est composé d'éléments qui respectent une structure relationnelle commune à ceux d'un stimulus présenté préalablement (la source) (**Figure 8**). Cette structure relationnelle correspond à un schéma d'organisation (e.g., la symétrie) qui s'applique à un attribut des éléments (e.g., la couleur). Lorsque le schéma s'applique à un même domaine, on parle d'analogie intra domaine. Dans le cas contraire (domaines différents), l'analogie est dite inter domaine. L'utilisation de cette tâche a permis d'explorer les bases neurales du raisonnement par analogie chez des sujets sains (Aichelburg et al., 2016; Volle et al., 2010), mais également chez des patients cérébrolésés (Urbanski et al., 2016).

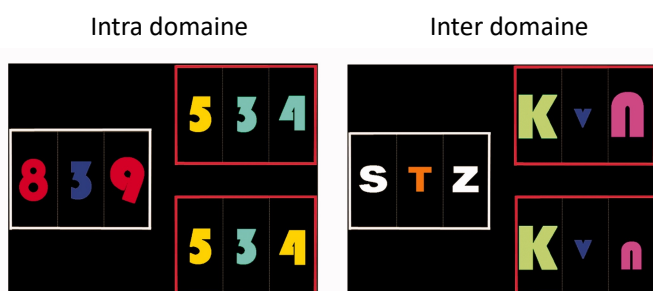


Figure 8. Analogy Task (Volle et al., 2010).

L'objectif est de trouver parmi les deux stimuli de droite (cibles) lequel présente des éléments qui respectent le même schéma que celui observé au sein des éléments du stimulus de gauche (source). Ici le schéma est celui de la symétrie appliquée en intra domaine (la couleur, à gauche ; la réponse est le stimulus du bas) ou en inter domaine (couleur/taille, à droite ; la réponse est le stimulus du haut)

La distinction entre l'analogie intra et inter dimensionnelle a également été réalisée avec du matériel verbal. Par exemple, l'analogie langue:goût :: nez:sentir est une analogie qui reste dans le même domaine (intra-domaine), alors que humain:jambe :: voiture:roue est une analogie qui change de domaine (inter-domaine). L'utilisation d'un matériel verbal permet d'évaluer l'effet de l'éloignement sémantique entre les domaines où l'analogie s'applique (Green, 2016; Green et al., 2010, 2017). Une analogie inter domaine nécessite une conceptualisation plus abstraite de la source et mobilise des capacités de créativité permettant de faire un lien entre des concepts éloignés en mémoire (Green et al., 2012; Krawczyk et al., 2011; Weinberger et al., 2016; Yang et al., 2022). On retrouve ici un point de convergence important entre l'analogie et la créativité, dont la discussion du lien fait l'objet d'un paragraphe spécifique.

2.3 Neuroimagerie de l'analogie

Du fait d'un matériel disponible limité et hétérogène, l'identification des bases neurales du raisonnement par analogie est difficile et peu d'études ont exploré les corrélats cérébraux qui y sont associés. Cependant, des méta-analyses permettent de converger vers quelques conclusions robustes (Hobeika et al., 2016; Vartanian, 2012). Ces méta-analyses ont regroupé l'ensemble des études utilisant l'IRM fonctionnelle avec des tâches d'analogie (respectivement 27 et 10 études). Elles ont permis de confirmer **l'implication du cortex préfrontal rostro-latéral gauche et ce quelle que soit la nature du matériel utilisé** (verbal ou visuospatial). Ce résultat est conforté par d'autres études plus récentes (Hartogsveld et al., 2018; Holyoak & Monti, 2021) et d'autres études utilisant des approches différentes comme la morphométrie (Aichelburg et al., 2016), la stimulation magnétique transcrânienne (Green et al., 2017) ou encore l'étude des patients cérébrolésés (Krawczyk, 2010; Morrison et al., 2004; Urbanski et al., 2016). D'autres méta-analyses portées sur le raisonnement inductif (qui inclut le raisonnement par analogie) permettent de converger vers les mêmes résultats (Shin & Jeon, 2021). Ces données suggèrent donc que le cortex préfrontal rostro-latéral gauche est une structure clef dans le raisonnement par analogie.

Cette région a été associée dans d'autres études aux capacités d'abstraction (Christoff et al., 2009), de comparaison et d'intégration de relations entre plusieurs éléments (Christoff et al., 2001; Krawczyk et al., 2011; Kroger et al., 2002; Ramnani & Owen, 2004), ou encore la coordination et le maintien d'un objectif dans un contexte de tâches multiples (Koechlin et al., 1999). Ces compétences sont souvent impliquées dans le raisonnement par analogie (Holyoak 2021). Un ensemble de régions plus postérieures a également été rapporté (Aichelburg et al., 2016), semblant se superposer au réseau de contrôle. Ces régions comprennent les régions insulaires, préfrontales postérieures, pariétales postérieures et les gyri frontaux supérieurs médians. Le recrutement de ces régions différerait selon le domaine dans laquelle la tâche était réalisée (Aichelburg et al., 2016) et sont pour certaines connectées au cortex préfrontal rostro-latéral gauche. Ces résultats suggèrent donc qu'il existe des réseaux permettant de traiter et d'intégrer les stimuli présentant des spécificités selon le domaine dans lequel l'analogie s'applique (Aichelburg et al., 2016; Urbanski et al., 2016).

Ainsi, le raisonnement par analogie est un processus complexe dont les bases neurales se précisent. Il semble impliquer une région critique (i.e., le cortex préfrontal rostro-latéral gauche) qui s'articule avec des réseaux impliquant des régions plus postérieures selon les demandes de contrôle ou le domaine de la tâche. L'implication du cortex préfrontal rostro-latéral gauche fait écho aux bases neurales de la créativité et questionne sur le lien existant entre la créativité et le raisonnement par analogie.

2.4 L'analogie créative

A la lumière de la section précédente, il est possible de **mettre en lien les bases neurales de la créativité avec celles du raisonnement par analogie**. En effet, ces deux fonctions cognitives semblent impliquer le **cortex préfrontal notamment dans sa portion rostro-latérale gauche** (Bendetowicz et al., 2018; Gonen-Yaacovi et al., 2013; Hobeika et al., 2016; Urbanski et al., 2016). Cela pourrait indiquer qu'elles partagent des mécanismes neurocognitifs communs. Bien que conceptuellement fascinant (Holyoak et al., 1995) très peu d'études ont exploré empiriquement ce lien. Green et al. (Green et al., 2010) ont montré que l'activité dans la région rostro-latérale du cortex préfrontal gauche était proportionnelle à l'éloignement (la distance sémantique) séparant la source et la cible d'une analogie. Ils ont également montré que la stimulation transcrânienne non invasive à courant direct excitant cette région permettait de générer des analogies plus distantes (i.e., créatives) (Green et al., 2017).

Ainsi, **certaines analogies requièrent une forme de créativité puisqu'elles demandent de faire des connexions entre des éléments qui en apparence n'ont aucun lien**. Ces analogies font référence aux analogie inter domaine discutées précédemment et illustrées par l'exemple de Platon et Aristote. Green et al. (Green, 2016; Green et al., 2012) ont montré que la capacité à générer des analogies entre des éléments sémantiquement éloignés était reliée à celles de créativité. De plus, il est **souvent rapporté un phénomène de Eurêka lors de la génération de certaines analogies** (Antonietti & Balconi, 2010; George & Wiley, 2018), comme en témoigne l'histoire d'Archimède présenté en introduction de cette partie. Cela suggère qu'il existe des processus cognitifs communs entre le raisonnement par analogie et la résolution de problèmes avec insight. L'apparition du Eurêka semble intuitivement reliée à la formation d'un

lien entre des éléments de l'analogie qui appartiennent à des domaines différents (i.e., analogie inter-dimensionnelle distante) (Dunbar & Fugelsang, 2005). Cependant, la nature du lien entre analogie, insight, et résolution de problèmes reste à clarifier.

Synthèse

Résumé – Le raisonnement par analogie est un raisonnement de haut niveau permettant la génération d'un schéma abstrait par l'identification de similarités de liens entre des éléments de différentes situations. Dans tous les domaines de notre vie quotidienne, l'analogie est présente et pourrait nous permettre de résoudre des nouveaux problèmes et de lier des éléments distants de nos connaissances.

Questions irrésolues – Les mécanismes à l'origine du raisonnement par analogie, leur implication dans la résolution de problèmes, et leur lien avec la créativité sont complexes. Former une analogie entre des domaines différents pourrait partager des processus communs à ceux impliqués dans la créativité, puisqu'il s'agit de relier des éléments qui sont distants ou non similaires. Mais quels sont ces processus communs ? Former une analogie distante pourrait modifier et enrichir le sens donné aux éléments de l'analogie et se représenter un schéma abstrait ou une nouvelle catégorie, pouvant induire des modifications dans nos associations sémantiques. Et à l'inverse, structurer nos connaissances en un schéma plus abstrait pourrait faciliter la formation d'analogies plus distantes, l'application à de nouvelles situations. Ainsi, certains mécanismes de raisonnement par analogie, en particulier ceux impliquant une restructuration de nos connaissances, pourraient participer à la résolution de problèmes et à la créativité. Ces mécanismes restent à mettre en évidence.

Partie 3

La résolution de problèmes créatifs

« Si le problème résiste, il faut s'en détourner, penser à autre chose et laisser venir des analogies évocatrices qui permettront d'aborder le problème par la bande »

Alain Connes
Mathématicien – Médaillé Field

Sommaire	p.
3.1 La restructuration au cœur de la résolution de problèmes créatifs	52
3.2 Le transfert par analogie pour résoudre des problèmes et son lien avec la restructuration	57
Synthèse	61

Les parties précédentes ont décrit les liens entre créativité, raisonnement par analogie et résolution de problèmes. Cependant la nature et les mécanismes de ces liens restent à préciser. Dans la suite de cette introduction, nous explorons dans quelles situations la résolution de problèmes implique de la créativité, et comment le raisonnement par analogie pourrait jouer un rôle. Cette approche nous permet de poser des hypothèses sur les mécanismes en jeu qui constituent la base des études expérimentales de cette thèse.

3.1 La restructuration au cœur de la résolution de problèmes créatifs

Il existe différents types de problèmes. Certains problèmes relèvent plus d'un raisonnement logique et/ou déductif : tous les éléments sont présents dans l'énoncé et la solution provient d'une manipulation de règles préexistantes qui leur sont appliqués. Dans cette situation, on accède à une représentation évidente du problème et de son objectif. La difficulté du problème peut alors être en lien avec la complexité des règles préexistantes à appliquer. Par exemple, prenons le problème suivant : « *Jasmine lance un caillou de 100 grammes à une vitesse de 30 m/s selon un angle d'inclinaison de 30° par rapport au référentiel terrestre plat. A quelle distance de Jasmine le caillou va-t-il atterrir ?* ». Ici, la représentation initiale du problème est évidente (i.e., le référentiel terrestre indiquant g – la pesanteur, le poids du caillou, la vitesse et l'angle du lancer), l'objectif est clair (i.e., calculer une distance) et les moyens pour y parvenir respectent des règles précises (i.e., les lois des forces mécaniques).

Au contraire, d'autres problèmes **ne disposent d'aucune règle préexistante permettant d'accéder directement et facilement à la solution** (Kaplan & Simon, 1990; Newell & Simon, 1972), **ou peuvent par leur énoncé, présenter un niveau de définition faible** (« *ill defined problem* ») (Reitman et al., 1964). C'est le cas par exemple du problème de Zoé. Ainsi, pour résoudre ce type de problèmes, il est nécessaire de se créer une représentation initiale du problème à partir de ses éléments à notre disposition mais également de nos connaissances et nos expériences (Ohlsson, 1992). Cette représentation repose sur des associations d'idées ou d'éléments de connaissance évoquées par l'énoncé. Elle peut être non pertinente car construite sur des associations d'idées fortes mais inutiles pour résoudre le problème (par exemple, associer « *ciel* » à « *oiseau* » dans l'énigme de Zoé) (Bowden et al., 2005) ou créer des contraintes implicites (par exemple, percevoir le ciel uniquement comme le ciel conventionnel) (Ohlsson, 1992). Cette représentation initiale non pertinente peut également générer une fixation mentale bloquant le raisonnement dans un chemin sans solution ou empêchant la production de réponses alternatives (Agogué et al., 2011). Elle peut donc aboutir à un état mental où aucune nouvelle idée ne vient à l'esprit souvent qualifié d'**impasse mentale**. Pour surpasser cette impasse et résoudre ce type de problèmes, il est

nécessaire **d'envisager le problème sous un autre angle, de réviser sa représentation mentale du problème** : c'est la **restructuration** (Durso et al., 1994; Knoblich et al., 1999; Mumford et al., 1991; Öllinger et al., 2014).

La **restructuration implique des étapes mentales additionnelles qui ont été mises en lien avec la créativité** (Cropley, 2006; Finke et al., 1992; Mumford et al., 1991), et consistent à réorganiser ses associations d'idées relatives au problème afin d'en générer une nouvelle représentation. Cette étape de restructuration sous-entend de rompre avec des associations d'idées fortes mais non pertinentes pour résoudre le problème, de relâcher les contraintes explicites ou implicites relatives au problème (Ohlsson, 1984, 1992) et de **moduler ou créer des associations d'idées entre des concepts sémantiquement éloignés** (S. A. Mednick, 1962; Schilling, 2005). La restructuration semble donc être un processus clef dans la résolution de problèmes créatifs (Durso et al., 1994; Knoblich et al., 1999; Mumford et al., 1991; Öllinger et al., 2014). Plus précisément, la restructuration est une étape qui a été **associée à la résolution de problèmes avec insight** dans différents modèles théoriques (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999; MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005; Sprugnoli et al., 2017). Ces modèles ont pour objectif de rendre compte des processus mentaux pendant la résolution d'un problème avec insight. Leur description permet de percevoir la place des processus de restructuration dans la résolution de problèmes créatifs avec insight. Plusieurs modèles existent :

- *The Progress Monitoring Theory* (MacGregor et al., 2001) : Cette théorie en deux étapes suppose dans un premier temps la mise en place d'un opérateur rationnel dans la recherche d'une réponse à un problème (par exemple dans le problème des neuf points⁶, l'approche initiale rationnelle cherche les lignes connectant le plus de points) (Burnham & Davis, 1969; Lung & Dominowski, 1985). Cette étape conduit à des échecs répétés et une impasse mentale. La deuxième étape nécessite de définir et explorer un nouvel espace de recherche relatif au problème. Elle suppose de monitorer la progression dans la tentative de résolution du problème (e.g., par la perception de tentatives échouées) et de relâcher les contraintes pour définir un nouvel espace de recherche (e.g., générer d'autres types de ligne) (Ohlsson, 1992). Les nouvelles

⁶ Dans ce problème, il est demandé de relier neuf points en traçant uniquement quatre segments sans lever le crayon. Ce problème est représenté dans la **Figure 1**.

stratégies ainsi générées sont testées en repartant à l'étape initiale du modèle jusqu'à la résolution du problème.

- *The Representational Change Theory* (Knoblich et al., 1999) : Cette théorie met en avant le changement représentationnel du problème dans la genèse du Eurêka (Öllinger et al., 2014). Ce changement implique de relâcher les contraintes en désactivant des représentations erronées du problème construites sur une expérience personnelle (Knoblich & Haider, 2019; Ohlsson, 1992) mais également de décomposer la représentation du problème en plusieurs éléments. Cette décomposition permet de réattribuer un sens nouveau aux éléments du problème et de créer de nouvelles représentations pour orienter la recherche vers une nouvelle voie (Ohlsson, 1990).
- La théorie de Bowden et al. (Bowden et al., 2005) : Cette théorie s'appuie sur des processus communs qui existent entre les mécanismes impliqués dans la résolution de problèmes et ceux dans la compréhension du langage. Ces processus correspondent au fait d'utiliser des connaissances générales pour combler les informations manquantes de l'environnement, et de les intégrer dans une unité cohérente de manière inconsciente pour devenir à terme accessible en conscience. Ainsi selon cette théorie, la représentation initiale du problème permet l'activation d'associations fortes mais non pertinentes pour résoudre le problème, couplées à celle d'associations faibles (et inconscientes) mais cruciales pour résoudre le problème. L'intégration et la réorganisation d'éléments du problème à travers des connaissances non dominantes pour l'individu ou non biaisées par le contexte permet de renforcer ces associations faibles. L'individu doit alors basculer son attention vers les associations inconscientes et les sélectionner pour les faire émerger en conscience (Siegler, 2000).
- La théorie de Schilling et al. (Schilling, 2005) : Cette équipe a proposé une approche théorique dans laquelle la résolution d'un problème avec insight implique une restructuration de l'organisation de nos associations d'idées. Cette théorie se base sur la modélisation de nos associations d'idées sous la forme de réseaux sémantiques au sein desquels les nœuds correspondent à des mots et les liens à la similarité sémantique entre deux nœuds. L'utilisation des réseaux sémantiques permet d'établir comment les associations d'idées s'organisent dans notre mémoire, notamment en

identifiant des communautés de mots. Ces communautés représentent des sous divisions du réseau contenant des mots très proches sémantiquement. Selon cette théorie, l'insight impliquerait la création de nouveaux liens entre des concepts appartenant à des communautés différentes, créant ainsi des raccourcis dans les réseaux sémantiques facilitant le passage d'un nœud à un autre et potentiellement à l'origine d'une cascade de nouvelles connexions.

En somme, ces théories mettent en avant l'**importance de la restructuration dans la résolution de problèmes avec insight afin de modifier son espace de recherche** relatif au problème (*the progress monitoring theory*), sa représentation du problème (*the representational change theory*), d'attribuer plus d'importance à des associations d'idées pertinentes (théorie de Bowden et al.) ou de modifier l'organisation de nos associations d'idées en mémoire par la création de nouveaux liens entre des communautés d'idées différentes (théorie de Schilling et al.). Ces modèles associent l'insight à une libération d'une représentation erronée du problème et la formation d'une nouvelle par la construction de liens entre des concepts pertinents pour la solution (Bowden et al., 2005). Ce point de vue contribue fortement à associer en théorie la restructuration à l'insight.

Bien que le rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes soit intuitivement satisfaisant et globalement accepté, les preuves empiriques démontrant ce lien sont étonnamment pauvres. La majorité des études existantes ont utilisé des problèmes souvent résolus avec insight pour étudier la restructuration, en postulant que la résolution de ce type de problèmes signe la restructuration. Cependant, considérer que résoudre un problème est un marqueur de restructuration pour étudier les mécanismes de résolution semble circulaire (Ash et al., 2009). De plus, certaines études avancent que la résolution de problèmes avec insight et la restructuration seraient des processus dissociables (Becker, Wiedemann, et al., 2020; Becker et al., 2021; Cushen & Wiley, 2012). D'autres études ont proposé une mesure subjective de restructuration de la représentation du problème initial (Sandkühler & Bhattacharya, 2008). Bien que plus précise, cette mesure reste indirecte puisqu'elle repose sur un rapport subjectif de restructuration (de l'ordre de la métacognition) plutôt que la restructuration en elle-même. Enfin, de rares études ont proposé des mesures plus directes de la restructuration. Cushen & Wiley (Cushen & Wiley, 2012) ont utilisé le

problème du triangle de cercles souvent associé à une résolution avec insight. Dans ce problème, 10 cercles sont positionnés de telle façon qu'ils forment un triangle pointant vers le haut (**Figure 9**) : l'objectif est de former un triangle pointant vers le bas en bougeant uniquement trois cercles. Avant et pendant la tentative de résolution du problème, une évaluation subjective visant à mesurer l'importance de chaque objet du problème (i.e., les 10 cercles) pour le résoudre était réalisée en utilisant une échelle visuelle. Les auteurs ont montré que les objets pertinents à bouger pour trouver la solution (i.e., les cercles 1, 7 et 10) devenaient de plus en plus importants dans l'évaluation subjective des participants ayant trouvé la solution comparativement aux autres cercles dont l'importance est diminuée.

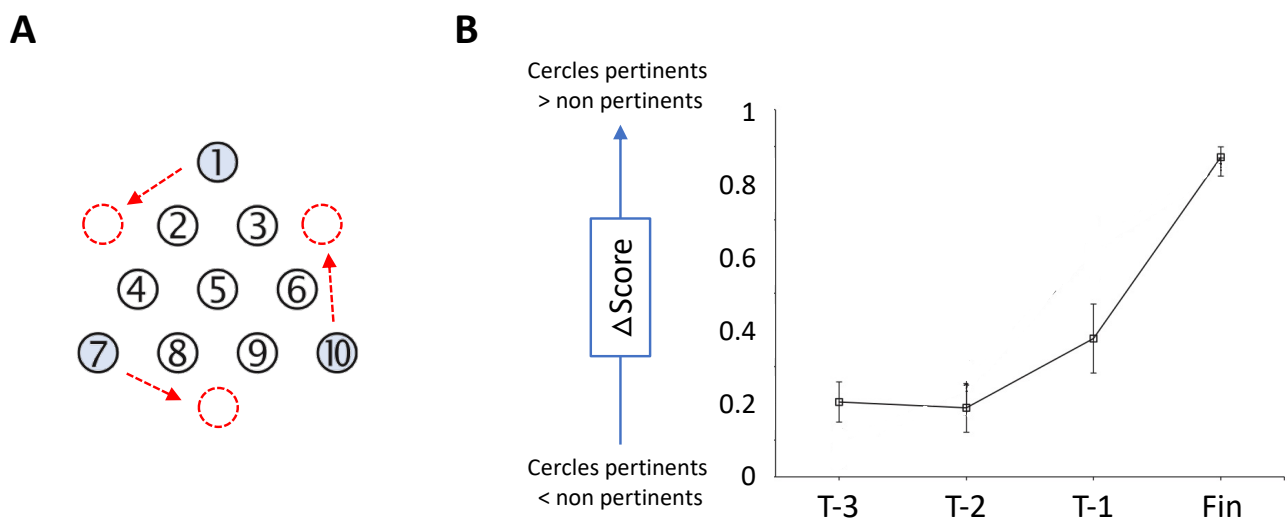


Figure 9. Restructuration dans la résolution de problèmes (Cushen & Wiley, 2012). La solution au problème du triangle (A) est indiquée par les mouvements de cercles représentés en rouge. Les cercles en bleus sont les cercles pertinents pour résoudre le problème. Leur évaluation subjective relative à leur pertinence pour résoudre le problème augmente progressivement au cours de la réflexion au problème comparativement aux autres cercles (B). Figure adaptée de Cushen & Wiley, 2012.

Danek et al. (Danek et al., 2020) ont montré des résultats similaires en utilisant des tours de magie. Dans cette étude, plutôt que d'évaluer l'importance des éléments qui composent le problème, les participants devaient évaluer l'importance de six verbes (un en rapport avec la solution, un en rapport avec une fausse solution et quatre distracteurs) pour trouver la solution au problème (i.e., comprendre le tour de magie). Les auteurs ont montré que le verbe associé à la solution était évalué comme étant de plus en plus important chez les participants expliquant correctement le tour de magie. Ainsi ces deux études indiquent un rôle

de la restructuration dans la résolution de problèmes. Cependant, les rapports subjectifs utilisés n'évaluent pas directement les associations d'idées mais la pertinence d'un élément du problème ou d'un verbe dans la résolution du problème. Enfin, les analyses portent exclusivement sur les sujets ayant trouvé la solution, ce qui ne permet pas d'établir un lien spécifique entre résolution du problèmes et restructuration.

3.2 Le transfert par analogie pour résoudre des problèmes et son lien avec la restructuration

Lors d'un raisonnement par analogie, nous avons vu qu'un schéma analogique était constitué. Une fois produit, ce schéma analogique peut-être décontextualisé à l'analogie en question et rendu abstrait. L'extraction de ce **schéma d'analogie** permet d'intégrer des informations abstraites et nouvelles dans notre mémoire sémantique et de générer de nouvelles idées ou une meilleure compréhension de la cible (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). Son utilisation dans un domaine nouveau permet de générer de nouvelles idées sur la base du raisonnement par analogie : c'est le **transfert par analogie**. Appliqué à la résolution de problèmes, **un nouveau problème peut être résolu par l'utilisation d'un schéma d'analogie extrait d'un problème analogue rencontré/résolu antérieurement** (Barnett & Ceci, 2002; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). La démonstration expérimentale du rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes a principalement utilisé le paradigme du problème de la forteresse et de la tumeur. Ce paradigme utilise deux énigmes qui présentent un lien analogique. Dans une première condition (condition naïve), l'énigme de la tumeur est présentée à des sujets totalement naïfs :

« Vous devez détruire une tumeur localisée dans l'estomac d'un patient. Vous savez qu'un certain type de rayon X peut être utilisé. La tumeur peut être détruite uniquement si les rayons traversent la tumeur en même temps, à une intensité suffisante. Seulement, à cette intensité, le tissu à travers lequel les rayons vont passer vont aussi être détruit. A une intensité plus faible, les rayons ne seront pas efficaces. Comment détruire la tumeur avec les rayons sans endommager le tissu sain en même temps ? »

Le taux de succès de cette énigme dans une population naïve est faible (environ 10% selon les études⁷) (Duncker & Lees, 1945; Gick & Holyoak, 1980). Ce faible taux de résolution est probablement lié au fait qu'il n'existe pas de règles préétablies permettant de répondre au problème, et que l'énoncé laisse la place à différentes représentations possibles. En d'autres termes, ce problème peut être qualifié de créatif. Prenons l'autre problème (celui de la forteresse) :

« Vous voulez capturer une forteresse située au milieu d'un village avec de nombreuses fermes autour. Il existe de nombreuses routes qui rayonnent de l'extérieur de la forteresse. Toutes ont été minées de sorte que si un petit groupe de soldats peuvent passer sur les routes en toute sécurité, tout groupe plus important fera exploser les mines et détruira les fermes aux alentours. Vous savez que si toute votre armée attaque la forteresse en même temps, elle peut être capturée. Comment capturer la forteresse sans endommager les fermes autour ? »

La réponse à ce problème est d'envoyer simultanément des petits groupes de soldats sur l'ensemble des routes qui convergent vers la forteresse. Ainsi, les mines ne s'activeront pas et l'ensemble de l'armée convergera au même moment à la forteresse, ce qui permettra de la capturer sans détruire les fermes autour. De ce problème, une règle générale peut être extraite correspondant à un schéma de convergence. Dans une deuxième condition (condition transfert), le problème de la forteresse et sa solution sont présentés à des sujets avant d'essayer de résoudre l'énigme de la tumeur. Cette configuration permet d'augmenter significativement son taux de résolution de manière spontanée (environ 20% selon les études). Lorsqu'il est explicitement indiqué qu'un lien existe entre le problème source et le problème analogue, presque tous les participants arrivent à trouver la solution (environ 90% de résolution selon les études). Le paradigme tumeur-forteresse met donc en avant l'analogie, et en particulier la phase de transfert, dans la résolution de problèmes créatifs. Le transfert peut être **spontané** (i.e., **pas d'indication explicite sur l'existence d'un lien entre les deux problèmes**) et requiert alors de former et d'appliquer le schéma d'analogie. Lorsqu'une indication explicite sur l'existence d'un lien entre les deux problèmes est donnée, le transfert

⁷ La réponse est d'envoyer simultanément des rayons X de faible intensité simultanément selon plusieurs trajectoires qui se croisent sur la tumeur. Ainsi, les rayons individuellement n'endommagent pas le tissu sain et convergent simultanément sur la tumeur pour atteindre une intensité suffisante pour la détruire.

est alors **dirigé**. Dans cette situation, **l'indice permet de guider le rappel du problème initial afin de faciliter l'évocation du schéma d'analogie** qui doit être ensuite appliqué. Ces résultats ont fait l'objet de plusieurs répliques (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; George & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1983, 1983), mais leur généralisation à d'autres couples d'énigmes reste limitée (Reed et al., 1974).

Malgré ces études répliquées, les mécanismes par lesquels le transfert par analogie s'opère sont encore à déterminer. En particulier, les mécanismes impliqués dans la génération du schéma d'analogie sont encore incertains. Plusieurs études ont montré que **le transfert par analogie est souvent influencé par les similarités superficielles** qui sont plus saillantes et plus facilement détectées par les sujets que les similarités de structure qui sont au cœur de l'analogie (Bassok & Olseth, 1995; Novick & Holyoak, 1991; Sander & Richard, 2005). En effet, la présence de similarités de surface entre la source et la cible facilite grandement leur mise en lien et ainsi le rappel du schéma d'analogie et son application (Holyoak & Koh, 1987; Luger & Bauer, 1978; Reed et al., 1974). Cependant, les similarités superficielles peuvent être trompeuses et au contraire empêcher le transfert par analogie. En effet, des similarités fortes peuvent limiter le rappel d'une situation pertinente pour le transfert par phénomène d'interférence. À l'inverse, l'absence de similarités superficielles peut également empêcher le transfert par analogie en limitant l'évocation analogique ou en laissant à penser qu'il n'existe pas de similarités structurelles (Bassok & Olseth, 1995). L'importance des similarités superficielles (comparativement aux similarités structurelles) dans l'évocation analogique pourrait dépendre des connaissances ou de l'expertise individuelle des sujets (Novick, 1988; Ohlsson, 1992; Zamani & Richard, 2000). En l'absence de similarités superficielles, le transfert par analogie est rarement observé de manière spontanée. Le transfert dirigé est alors plus efficace car la détection du lien structurel est facilitée par l'indice donné (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). Ces données confirment que les relations structurelles sont le cœur du transfert par analogie (Raynal et al., 2020) qui peut être influencé positivement ou négativement par des relations superficielles (Bassok & Olseth, 1995).

Ainsi, il est possible que les capacités de transfert par analogie dépendent d'un passage d'une représentation initiale vers une représentation plus structurelle du problème source,

c'est à dire d'une restructuration de la représentation du problème par formation du schéma analogique (Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Sander & Richard, 2005). En d'autres termes, **la restructuration du problème initiale en un schéma plus abstrait pourrait jouer un rôle dans la résolution de problèmes analogues** (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). Une étude a exploré les facteurs individuels qui peuvent expliquer qu'un individu arrive à résoudre un problème analogue de manière spontanée (Cushen & Wiley, 2018). Dans cette étude, les auteurs montrent que les capacités individuelles à créer des associations éloignées (mesurées par la *Remote Associates Task*) sont associées aux capacités de transfert par analogie spontanée. Plus intéressant encore, cette relation était médiée par la qualité de la représentation mentale du problème source. En d'autres termes, plus un individu présentait des facilités à combiner des éléments entre eux, plus leur représentation du problème source était précise, ce qui permettait d'augmenter la résolution d'un problème analogue de manière spontanée. La représentation initiale et restructurée du problème source semble être un mécanisme important dans la génération d'une règle générale permettant le transfert (Blanchette & Dunbar, 2002; Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Sander & Richard, 2005; Silliman & Kurtz, 2019). La création d'une règle générale sous-entend de réorganiser sa représentation des problèmes pour intégrer de nouvelles informations correspondant au schéma d'analogie (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). Ces mécanismes restent encore non totalement élucidés et hypothétiques.

Pour aller plus loin dans ce domaine, le développement de nouveaux matériels doit être considéré. En effet, dans les études de transfert, les problèmes sont souvent opérationnalisés expérimentalement par une énigme ou une devinette se présentant sous la forme d'une courte histoire. Bien que ce matériel ait permis de démontrer l'importance du transfert par analogie dans la résolution de problèmes, il présente des limitations. Dans ces études, le participant travaille souvent sur une énigme avec un temps de réflexion long. Ainsi, il est rare de disposer d'un score quantifiant la capacité à transférer à l'échelle du sujet. La variable comportementale est donc binaire (car centrée sur le caractère correct ou incorrect de la réponse) avec un essai unique (un problème), ce qui contraint drastiquement les analyses statistiques. Ces limitations (contraintes temporelles, contraintes du nombre d'essais, contraintes de variables comportementales extraites) sont particulièrement

bloquantes pour étudier les corrélats cérébraux du transfert par analogie par les méthodes de neuroimagerie. La pauvreté de matériels alternatifs disponibles est donc un obstacle dans l'étude du transfert par analogie. De plus, cela est à l'origine d'un manque de réplication majeure des études actuelles en utilisant un paradigme différent de celui du problème de la forteresse et de la tumeur.

Synthèse

Résumé – L'étude de la résolution de problèmes par le prisme de la créativité et du raisonnement par analogie conduit à émettre des hypothèses quant aux mécanismes impliqués dans la résolution de problèmes. La restructuration est un processus permettant de générer des représentations alternatives d'un problème. Ainsi, elle apparaît comme un mécanisme clef dans la résolution de problèmes créatifs. La restructuration de la représentation mentale d'un problème ou sa restructuration en un schéma plus abstrait pourrait jouer un rôle dans la résolution de problèmes analogues. Ces observations conduisent à relier la restructuration à la résolution de problèmes créatifs et au transfert par analogie.

Questions irrésolues – Bien qu'intuitivement satisfaisantes, les théories décrivant la restructuration comme un mécanisme de la résolution de problèmes créatifs manquent cruellement de démonstration expérimentale. De plus, aucune étude n'a étudié le rôle de la restructuration dans le transfert par analogie. Les mécanismes de restructuration restent à explorer et les approches basées sur les réseaux sémantiques (ou les espaces sémantiques) constituent des méthodes de choix pour le faire.

Partie 4

L'apport des sciences des réseaux

« Je me trouvais un jour dans une compagnie, où, à l'occasion du jeu d'échec quelqu'un proposa cette question : de **parcourir avec un cavalier toutes les cases d'un échiquier, sans parvenir jamais deux fois à la même, et en commençant par une case donnée**. [...] Ce n'est aussi que dans cette vue que j'ose proposer mes recherches sur cette question : auxquelles j'ai été conduit par une idée toute particulière, que Mr Bertrand de Genève m'a fournie ; car, quoiqu'elle soit légère en elle-même, et tout à fait étrangère à la Géométrie, elle doit être regardée comme très remarquable, dès qu'on aura trouvé moyen d'y appliquer l'Analyse. Or je ferai voir qu'elle est susceptible d'une analyse toute particulière, qui doit mériter d'autant plus d'attention, que cette analyse demande des raisonnements peu usités ailleurs. On convient aisément de l'excellence de l'Analyse, mais on la croit communément bornée à de certaines recherches, qu'on rapporte aux Mathématiques ; et partant il fera toujours fort important d'en faire usage dans des matières qui lui semblent refuser tout accès : puisqu'il est certain qu'elle renferme l'art de raisonner dans le plus haut degré. On ne saurait donc étendre les bornes de l'Analyses, sans qu'on ait raison de s'en promettre de très grands avantages. »

Extrait de Leonhard Euler

Solution d'une question curieuse que ne paroît soumise à aucune analyse, 1766

Sommaire	p.
4.1 Histoire et application des réseaux	64
4.2 Méthodologie des réseaux	67
4.3 Les réseaux sémantiques appliqués à la créativité	71
Synthèse	75

Le manque d'études ayant étudié le rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes créatifs et dans le transfert par analogie est probablement lié à l'absence de méthodologie disponible pour quantifier directement ces processus de restructuration. La science des réseaux et la théorie des graphes constituent une méthodologie permettant d'appréhender des systèmes complexes tels que la mémoire sémantique. Ainsi, elle offre un outil pour quantifier l'organisation des associations d'idées en mémoire.

Dans cette partie, nous introduisons cette approche en présentant leur utilité et leurs spécificités méthodologiques. Enfin, nous exposons comment l'utilisation des réseaux sémantiques a permis de mieux comprendre des fonctions telles que la créativité et comment ces nouveaux outils pourraient nous aider dans la compréhension des mécanismes de résolution de problèmes créatifs.

4.1 Histoire et application des réseaux

La **théorie des graphes** est une approche mathématique permettant d'appréhender des systèmes complexes composés d'éléments qui respectent une organisation particulière sous la forme de **réseaux** (Bassett & Sporns, 2017; Boccaletti et al., 2006; Siew et al., 2019). Ces réseaux sont constitués de **nœuds** connectés par des **liens** qui prennent une signification différente selon la nature du réseau. Cette méthodologie apparaît au cours du XVIII^{ème} siècle avec le célèbre problème des sept ponts de Königsberg. La question posée par ce problème est de trouver un chemin de promenade qui passe par chaque pont uniquement une fois (**Figure 10A**). Pour y répondre, le mathématicien Leonhard Euler a modélisé le problème par un réseau. Depuis, les sciences des réseaux se sont largement développées et de nombreuses applications nouvelles ont émergé. Leur utilisation se retrouve en informatique, génétique, sociologie ou encore en linguistique (**Figure 10B**) (Bassett & Sporns, 2017).

Cette méthodologie a été **appliquée en neurosciences pour expliquer des systèmes cognitifs complexes**, en particulier la mémoire ou le langage (Baronchelli et al., 2013; Beckage & Colunga, 2016; De Deyne et al., 2017; Hills & Kenett, 2021; Solé et al., 2010), mais également pour étudier la connectivité cérébrale (Bassett & Sporns, 2017; De Vico Fallani et al., 2014; Sporns, 2011, 2018). Il est actuellement classique de modéliser notre mémoire sémantique par l'intermédiaire d'un réseau sémantique, au sein duquel les nœuds correspondent à des mots (unité du système sémantique) et les liens représentent la similarité (ou distance) sémantique entre deux nœuds (Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Goñi et al., 2011; Morais et al., 2013; Steyvers & Tenenbaum, 2005). Cette modélisation a permis de mieux comprendre comment la mémoire sémantique était organisée et d'opérationnaliser des modèles cognitifs (Collins & Loftus, 1975; Kumar, 2021; Steyvers & Tenenbaum, 2005).

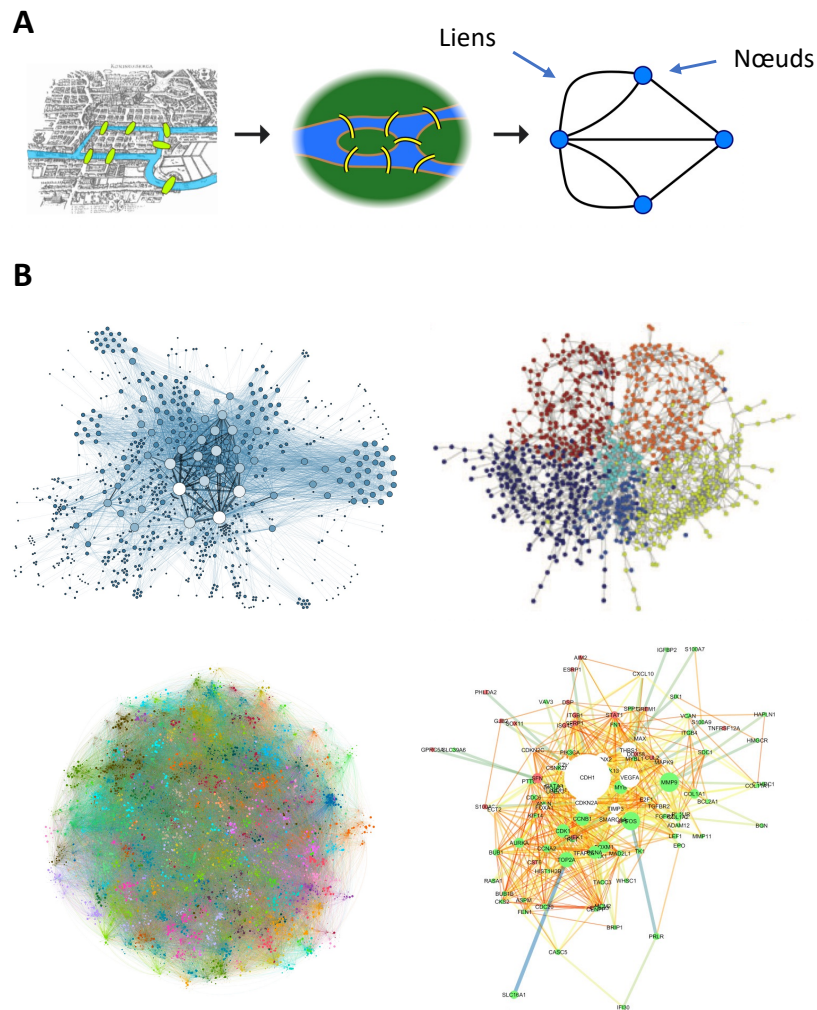


Figure 10. La science des réseaux. A. Problème des sept ponts de Königsberg. Dans ce problème un chemin de promenade qui passe par chaque pont uniquement une fois doit être trouvé. Leonhard Euler a proposé une solution en représentant le problème sous la forme d'un réseau. **B. Applications actuelles des réseaux.** Exemple de réseaux appliqués à l'étude des réseaux sociaux (en haut à gauche) (Grandjean, 2014), à la neuroimagerie (Sporns, 2011), aux réseaux sémantiques (en bas à gauche)⁸ et à la génétique (en bas à droite) (Pranavathiyani et al., 2019).

La difficulté pour construire des réseaux sémantiques est de **déterminer comment choisir les nœuds et comment sélectionner et pondérer les liens entre eux, de façon à refléter la distance sémantique entre deux mots ou concepts** (De Deyne et al., 2017; Y. N. Kenett, 2019; Zemla & Austerweil, 2018). Des approches utilisent des méthodes automatiques qui permettent de calculer la distance qui sépare deux mots dans de larges corpus de texte (e.g. Wikipédia) afin d'en extraire une fréquence de co-occurrence lexicale qui reflète indirectement la distance sémantique (Beaty et al., 2022; Landauer et al., 1998; Landauer &

⁸ Image réalisée par Emmanuelle Volle

Dumais, 1997; Yu et al., 2022). L'inconvénient est que certains mots très associés ne vont pas ou peu apparaître ensemble, car souvent responsables de pléonasmes (« la banane jaune »), ou que le contenu des corpus ne reflète pas forcément celui de nos pensées. D'autres approchent utilisent des dictionnaires associatifs, qui recensent pour un mot donné les mots associés en termes de fréquence sur la base d'un panel d'individus volontaires (Debrenne, 2011). Même si grâce à ce type de dictionnaire, la distance sémantique est mieux approximée, le nombre de mots disponible y est souvent limité, surtout en français. De plus, ces deux dernières approches ne permettent pas de réaliser des réseaux sémantiques à l'échelle d'un individu. En effet si l'association entre le mot *A* et le mot *B* peut être forte chez un individu, elle ne l'est peut-être pas chez un autre. Pour prendre en compte ces variations inter-individuelles, une nouvelle méthode a été développée (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019; M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022). A l'aide d'une tâche de jugement d'association (*relatedness judgement task*, RTJ) chaque individu juge de lui-même la force d'association entre des mots. Ainsi il est possible de construire des réseaux propres à chaque individu (**Figure 11**).

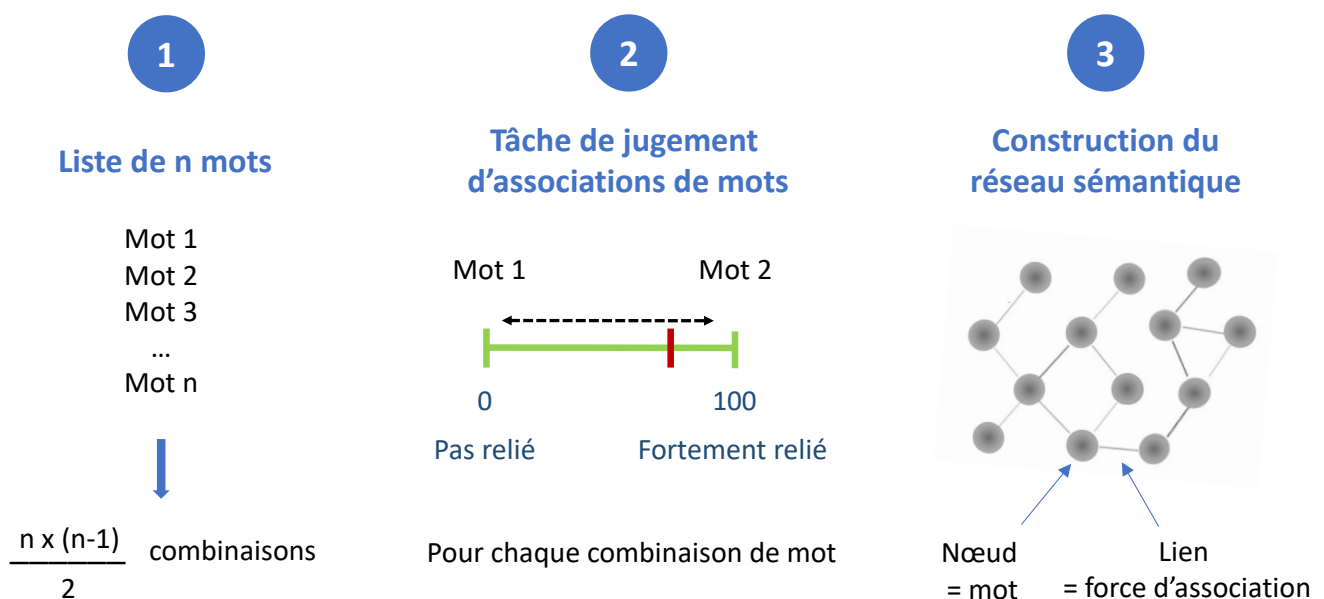


Figure 11. Construction de réseaux sémantiques individuels en utilisant la RJT. La première étape est de constituer une liste de mot qui déterminera le nombre de différentes combinaisons de paires possibles. La deuxième étape est de réaliser la RJT, i.e., juger le niveau d'associations pour chaque paire de mots à l'aide d'une échelle visuelle. La troisième étape est la construction du réseau sémantique individuel où les nœuds sont les mots de la liste et les liens les jugements donnés pendant la RJT.

4.2 Méthodologie des réseaux

Un réseau est construit à partir d'une matrice de contiguïté, composées d'un nombre de lignes et de colonnes représentant le nombre de nœuds et liens dans le réseau (**Figure 12**). Plusieurs propriétés déterminent la nature d'un réseau. Il peut être **directionnel ou non directionnel** (**Figure 12**). Dans un réseau non directionnel, la matrice de contiguïté est symétrique. Ainsi, la relation entre le nœud a et b est équivalente à celle entre le nœud b et a . Si cette condition n'est pas respectée, le réseau est caractérisé de directionnel, ajoutant une information de causalité dans le lien relationnel et donc dans l'organisation du réseau. Un réseau peut être **pondéré ou non pondéré** (**Figure 12**). Selon la nature du réseau, chaque lien va être défini par une valeur (un poids) permettant de le caractériser (par exemple, la force d'association dans un réseau sémantique). Dans un réseau non pondéré, le lien est binaire (1 s'il existe ou 0 s'il n'existe pas) et peut résulter d'un seuillage par une valeur donnée. Dans la situation où il résulte d'un seuillage, tous les liens avec une valeur supérieure à ce seuil seront conservés mais perdront l'information de cette valeur, alors que dans le cas contraire, tous les liens avec une valeur inférieure à ce seuil seront considérés comme non existants. En revanche, dans le cas où le réseau est pondéré, la valeur initiale des liens est préservée et les données ne sont pas transformées.

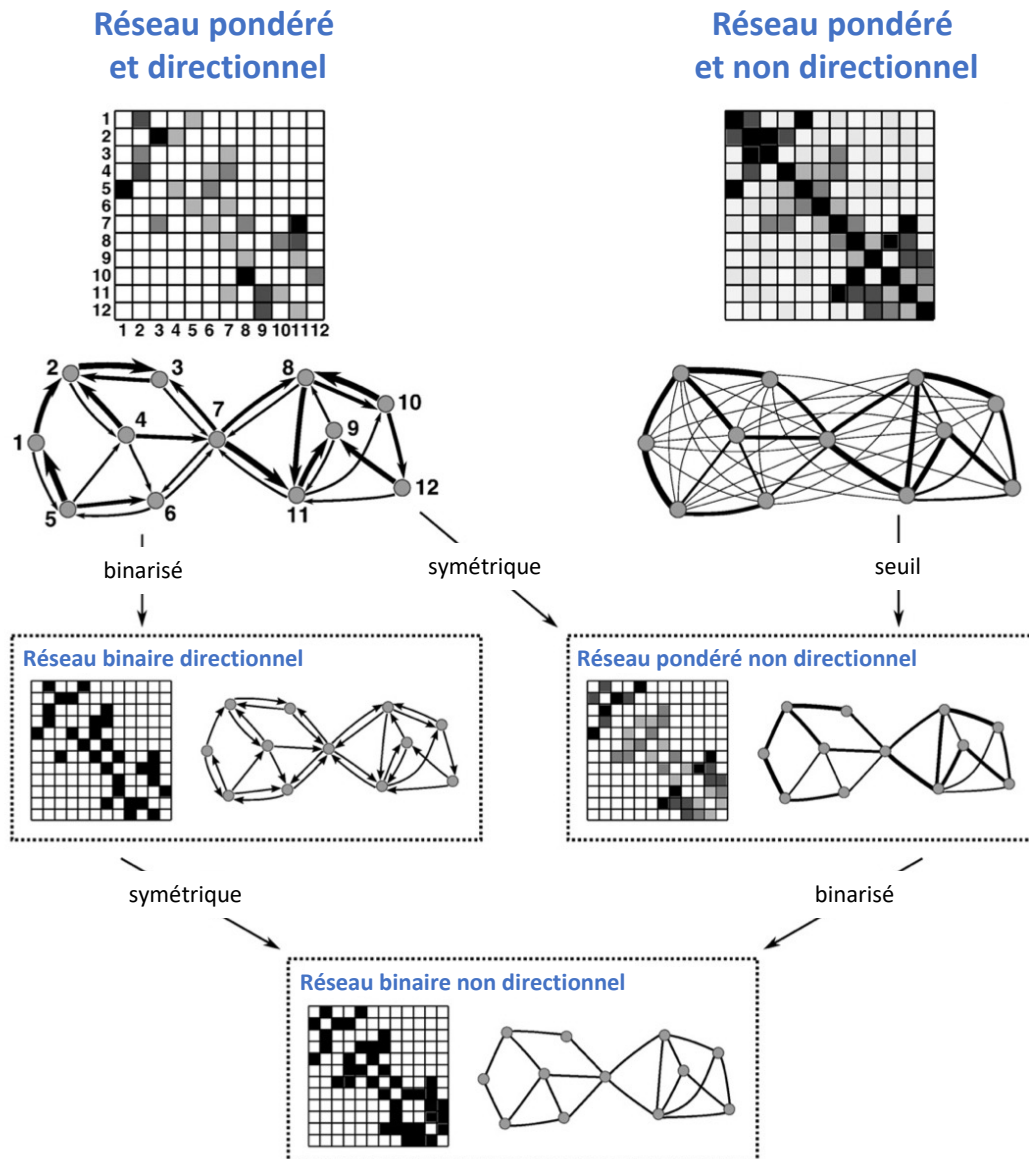


Figure 12. Différentes méthodes pour construire des réseaux. Chaque réseau est accompagné de sa matrice de contiguïté où chaque ligne et colonne représentent un nœud et chaque cellule de la matrice un lien. Ils synthétisent les différentes méthodes pour les construire (pondéré/non pondéré, directionnel/non directionnel). Figure adaptée de Rubinov & Sporns, 2010

En plus de proposer une représentation informative sur l'organisation d'un système complexe, la théorie des graphes permet d'extraire des informations mathématiques (les métriques) offrant une manière de quantifier l'organisation de ce système (Rubinov & Sporns, 2010). Ces **métriques** informent sur l'**organisation globale du réseau** (à quel point un réseau est compact, efficace, interconnecté, ...) mais également sur son **organisation locale**. Lorsqu'elles s'adressent à une échelle locale, les métriques se calculent pour chaque nœud (à

quel point un nœud est central, influent, interconnecté avec ses voisins, ...) ou chaque lien (à quel point un lien est important pour échanger de l'information dans le réseau, ...). Chaque métrique présente une signification particulière dans l'organisation du réseau et se calcule différemment selon les propriétés du réseau (directionnel ou non, pondéré ou non). Certaines sont spécifiques aux liens ou aux nœuds, d'autres n'ont de sens qu'à l'échelle globale. Certaines métriques ont montré leur importance en particulier pour les réseaux sémantiques **(Figure 13)** :

- Le **chemin le plus court** (*shortest path length*, SPL) est une métrique de lien indiquant la manière la plus courte de relier deux nœuds dans un réseau. Il peut se calculer à l'échelle locale pour chaque lien ou à l'échelle du réseau en moyennant l'ensemble des chemins les plus courts de tous les liens du réseau (*average shortest path length*, ASPL). **Plus cette métrique diminue, plus cela indique que les deux nœuds constituant le lien sont très proches (SPL) ou que le réseau est très compact (ASPL)**. Plus classiquement, le SPL et l'ASPL sont transformés (par une fonction inverse) pour créer l'*efficiency*. Cette métrique mesure à quel point un lien ou le réseau est efficace pour échanger de l'information. Ainsi, à l'échelle des réseaux sémantiques, l'*efficiency* et l'ASPL **reflètent à quel point toutes paires de nœuds dans le réseau sont proches les unes des autres** (Y. N. Kenett et al., 2017; Latora & Marchiori, 2001; Strang et al., 2018).
- Le **coefficient de clustering** (*clustering coefficient*, CC) est une métrique appliquée aux nœuds. Il représente la probabilité que deux nœuds soient connectés sachant qu'ils ont un voisin en commun. Il permet de mesurer l'interconnectivité d'un nœud (local) ou d'un réseau (global). Dans un réseau sémantique, une **forte valeur de CC indique que les nœuds sont connectés les uns aux autres**.
- La **modularité** (*modularity*) est une métrique qui se calcule uniquement à l'échelle du réseau. Elle permet de quantifier le degré par lequel le réseau peut être sous-partitionné en communautés. **Plus la modularité augmente, plus le réseau peut être séparé en plusieurs communautés** (Newman, 2006; Siew et al., 2019).
- L'*eigenvector centrality* (EV) constitue une métrique de centralité de nœuds. Il représente la centralité d'un nœud (nombre de liens qui le connecte à d'autres nœuds)

en prenant en compte une mesure d'influence (la connexion est considérée comme d'autant plus importante si elle le relie à un autre nœud lui-même central). Ainsi, **plus l'EV d'un nœud augmente, plus il apparait central, influent et important dans le réseau**. Cette mesure de centralité a montré dans des études comparatives une plus grande reproductibilité comparativement à d'autres mesures de centralité (comme le degré d'un nœud ou encore la *betweenness centrality*) (Christensen et al., 2018).

Ces métriques offrent des outils cruciaux pour quantifier et comprendre comment s'organise un réseau. Il existe une quantité importante de métriques différentes (Oldham et al., 2019; Rubinov & Sporns, 2010). Leur calcul constitue la base des études utilisant la théorie des graphes. Les métriques détaillées précédemment sont les principales métriques utilisées dans la suite de l'exposé.

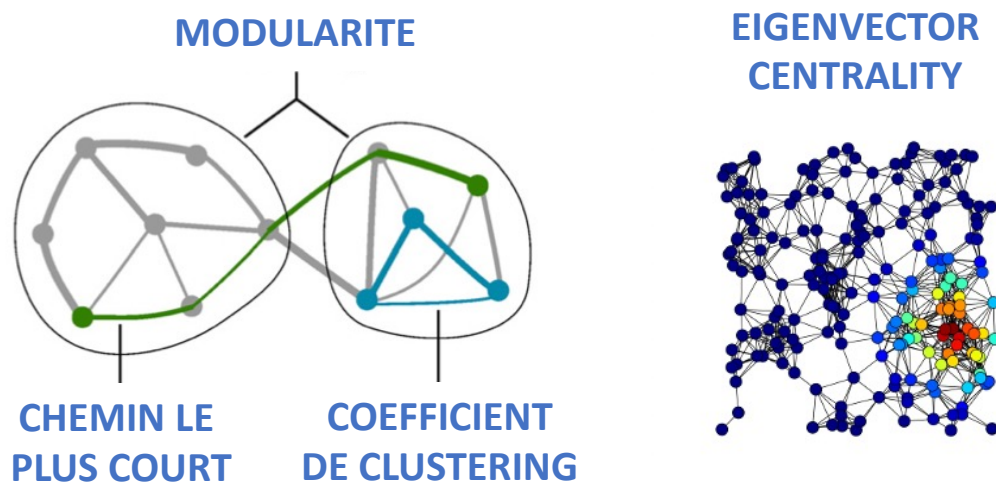


Figure 13. Quantifier l'organisation de réseaux par le calcul de métriques. Représentation schématique des principales métriques utilisées dans cette thèse. Figure adaptée de Rubinov & Sporns, 2010.

4.3 Les réseaux sémantiques appliqués à la créativité

L'utilisation des sciences des réseaux sémantiques a ouvert un nouveau champ de recherche dans le domaine des neurosciences de la créativité. En effet, les théories associatives de la créativité mettent l'accent sur le rôle de l'organisation de la mémoire sémantique dans la genèse d'une pensée créative (Benedek & Neubauer, 2013; Y. N. Kenett et al., 2014; M. T. Mednick et al., 1964; S. A. Mednick, 1962). Ainsi, **plusieurs études pionnières ont utilisé les réseaux sémantiques pour mieux comprendre les capacités et comportements créatifs** (Benedek, Kenett, & Umdasch, 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Y. N. Kenett et al., 2011, 2014; Y. N. Kenett, 2019; Y. N. Kenett & Faust, 2019; M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Yan et al., 2021).

Plusieurs études ont **relié l'organisation de la mémoire sémantique avec des traits de créativité**. Par exemple, Kenett et al. (Y. N. Kenett et al., 2014) ont montré qu'un groupe d'individus à haut potentiel créatif (évalué par une tâche en pensée divergente) présentait en moyenne un réseau sémantique plus connecté (plus grande valeur de CC et d'*efficiency*), plus compact (plus faible valeur de ASPL) et moins sous partitionné (plus faible valeur de modularité) comparativement à un groupe d'individus à faible potentiel créatif (**Figure 14A**). Ces résultats ont été répliqués par plusieurs études ayant utilisé une approche permettant de construire des réseaux sémantiques à l'échelle individuelle (Benedek, Kenett, & Umdasch, 2017; Bernard et al., 2019; M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Yan et al., 2021) (**Figure 14B**). Dans une étude réalisée dans notre équipe, nous avons pu montrer que les métriques des réseaux sémantiques individuels pouvaient prédire une mesure écologique de créativité quantifiant le niveau d'engagement dans des activités créatives du quotidien et leur valorisation (M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022). De manière plus intéressante, la structure de la mémoire sémantique individuelle jouait le rôle de médiateur dans le lien existant entre la connectivité cérébrale et cette mesure de créativité dans la vie réelle (M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022).

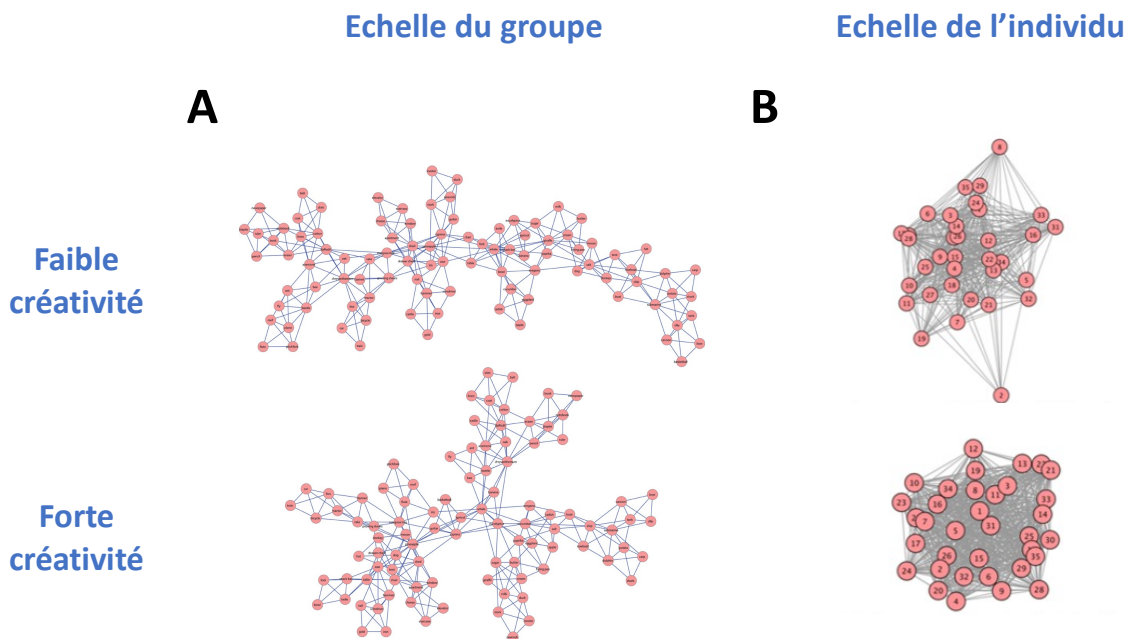


Figure 14. L'organisation de la mémoire sémantique est associée à des traits de créativité. Représentation des réseaux sémantiques à l'échelle du groupe (A) et de l'individu (B) selon le niveau de créativité. Figures adaptées de Y. N. Kenett et al., 2014 et M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022.

Enfin, dans une autre étude récente, nous avons exploré les mécanismes neurocognitifs impliqués dans l'exploration de notre mémoire sémantique en lien avec la créativité (M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022). Pour cela, nous avons développé une tâche de fluence associative utilisant des mots ambigus polysémiques (e.g., rayon), permettant de distinguer deux composantes dans l'exploration de notre mémoire sémantique : le « *clustering* » correspondant à la génération d'idées appartenant à une même signification du mot (e.g., soleil puis ultra-violet), et le « *switching* » correspondant à la génération d'une idée appartenant à une nouvelle signification du mot (e.g., soleil puis magasin). La capacité à changer de cluster (le « *switching* ») était en lien avec la structure individuelle de la mémoire sémantique : plus cette capacité était élevée, plus le réseau sémantique était efficient (forte *efficiency*), interconnecté (fort CC) et moins sous-partitionné (faible modularité).

En plus d'être un système complexe, la mémoire sémantique est également un système dynamique qui évolue avec le temps et se modifie par le contexte (Bassett & Sporns,

2017; Boccaletti et al., 2006; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Y. Kenett & Thompson-Schill, 2020; Schilling, 2005; Yee & Thompson-Schill, 2016). L'organisation de nos associations sémantiques en mémoire capturées par les réseaux sémantiques pourrait refléter la manière dont chacun se représente un problème donné. L'étude de changements dans l'organisation des réseaux sémantiques pourrait donc permettre de capturer un changement dans la représentation du problème au cours de sa résolution, c'est à dire capturer la restructuration nécessaire à sa résolution. Ainsi, si les réseaux sémantiques ont été utilisés jusque-là pour capturer l'organisation des associations sémantiques en mémoire et la relier à la capacité créative individuelle, nous proposons ici **d'utiliser les réseaux sémantiques afin d'examiner des processus créatifs** (i.e., la restructuration), nous permettant d'accéder à certains mécanismes sous-tendant la résolution de problèmes.

Seulement une seule étude a exploré si le fait de résoudre une énigme était associé à une structure des associations d'idées différentes en utilisant les réseaux sémantiques (Durso et al., 1994). Dans cette approche, les réseaux sémantiques sont restreints à certains nœuds correspondant à des mots-clés en rapport avec la solution ou l'énoncé du problème. Dans cette étude, les auteurs ont montré que les nœuds représentant des mots pertinents pour la résolution du problème étaient centraux uniquement dans le groupe de sujets ayant trouvé la solution (solveurs). Dans le réseau sémantique du groupe n'ayant pas trouvé la solution (non-solveurs), les mots centraux étaient représentés par des mots explicitement donnés dans l'énoncé du problème (**Figure 15**). Cette étude (Durso et al., 1994) permet d'étayer le rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes et suggère que l'utilisation des réseaux sémantiques est une approche prometteuse pour l'explorer. Néanmoins, ce travail pionnier a analysé l'état du réseau après avoir travaillé sur l'énigme mais n'a pas évalué le changement au sein du réseau sémantique qui nécessiterait de prendre en compte l'organisation initiale du réseau sémantique. De plus, les réseaux sémantiques ont été construits à l'échelle du groupe et non de l'individu, sous-estimant ainsi la variabilité inter-individuelle dans la mesure des associations d'idées. Enfin, aucune réplique n'a été publiée depuis, instaurant un doute quant à la robustesse et la généralisation des résultats, notamment à d'autres problèmes.

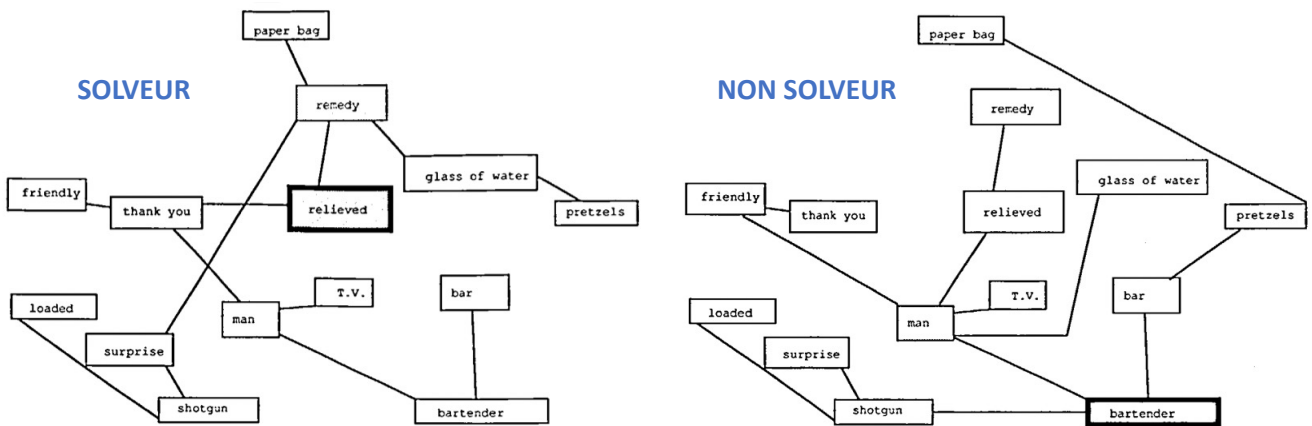


Figure 15. Restructuration des réseaux sémantiques dans la résolution d'un problème. Les réseaux sémantiques relatifs à un problème à l'échelle du groupe de sujets solveurs (à gauche) et non-solveurs (à droite). Les nœuds encadrés en noirs sont les nœuds centraux représentés par un mot en rapport avec la solution pour les solveurs et un mot en rapport avec l'énoncé pour les non-solveurs.

Enfin, si comme nous le proposons plus haut, la **restructuration peut être rapprochée des mécanismes permettant de raisonner par analogie** (voir partie 2), et de résoudre de nouveaux problèmes par transfert d'analogie, la méthode des réseaux sémantique pourrait être utile pour adresser cette question. A notre connaissance, **aucune étude n'a exploré le raisonnement par analogie par le prisme des réseaux sémantiques.**

Synthèse

Résumé – Les méthodes des réseaux sémantiques constituent un outil puissant pour comprendre des systèmes complexes tels que l'organisation d'associations sémantiques en mémoire. Ces méthodes ont été utilisées pour mettre en relation des traits ou performances (e.g., de créativité) avec l'organisation du réseau sémantique. Nous proposons ici l'utilisation des réseaux sémantiques pour comprendre les mécanismes impliqués dans la résolution de problèmes. En effet, l'étude des réseaux sémantiques utilisant des mots en rapport avec un problème pourrait permettre d'estimer la représentation mentale qu'un individu se fait du problème à résoudre. Seulement une étude a utilisé cette méthodologie pour aborder la restructuration dans la résolution de problèmes (Durso et al., 1994) montrant que l'organisation des associations d'idées relatives à un problème était différentes chez les individus qui trouvaient la solution par rapport à ceux qui ne la trouvaient pas.

Questions irrésolues – La restructuration est un processus dynamique au cours duquel la représentation mentale du problème se modifie. Bien que novatrice, l'étude pionnière de Durso et al. (Durso et al., 1994) n'a pas directement mesuré ce changement mais seulement étudié l'organisation finale des réseaux sémantiques (i.e., après avoir essayé de résoudre le problème). De plus, l'absence de réplique questionne la robustesse de ces résultats. Depuis cette étude, les méthodes des réseaux sémantiques ont considérablement évolué, ouvrant de nouvelles voies d'exploration. La problématique principale est de trouver une approche permettant de considérer un état initial propre à chaque individu (i.e., la représentation initiale du problème) et un état final (i.e., une représentation finale du problème qui permette ou non sa résolution). Ainsi, si les réseaux sémantiques permettent de capturer ce changement d'état, cela offre une nouvelle perspective pour mieux comprendre les mécanismes de résolution de problèmes créatifs par restructuration, et le rôle de cette restructuration dans le transfert par analogie et la résolution de problèmes analogues.

Partie 5

Le sommeil, un accélérateur de résolution de problèmes ?

« J'ai tourné ma chaise vers le feu (après avoir travaillé un certain temps sur le problème) et suis tombé dans un demi-sommeil. De nouveau, les atomes s'agitèrent devant mes yeux [...] De longues chaînes, souvent associées de façon plus serrée, étaient toutes en mouvement, s'entrelaçant et se tortillant comme des serpents. Mais regardez ! Qu'était-ce que cela ? Un des serpents avait saisi sa propre queue, et cette forme tournoyait de façon moqueuse devant mes yeux. Comme dans un éclair de lumière, je me réveillais [...] Apprenons à rêver, mais gardons-nous de rendre publics nos rêves avant qu'ils n'aient été mis à l'épreuve par notre esprit bien éveillé »

Friedrich Kekulé von Stradonitz – Chimiste organicien
Propos lors du 25ème anniversaire de la Société chimique allemande, 1980

Sommaire	p.
5.1 Définition et moyens d'études	77
5.2 Le sommeil dans la mémoire	80
Consolidation des souvenirs	
Transformation des souvenirs	
5.3 Rôle du sommeil dans la résolution de problèmes	87
Apport des données expérimentales	
Apport des données théoriques	
Synthèse	96

Du fait de son implication dans des processus mnésiques, le sommeil est souvent présenté comme un facteur pouvant moduler nos souvenirs et nos capacités de résolution de problèmes. Après avoir présenté succinctement les bases théoriques du sommeil, nous présentons sa place dans les différents mécanismes mnésiques. Puis, à partir des données expérimentales et théoriques, nous montrons que le rôle du sommeil dans la résolution de problèmes reste encore débattu mais prometteur.

5.1 Définition et moyens d'études

Le **sommeil** correspond à un état naturel, réversible et essentiel. Il est associé à un état mental au cours duquel on observe une diminution du niveau de vigilance et une réduction des réponses aux stimuli extérieurs. Au cours d'une nuit, plusieurs états se succèdent formant des stades qui s'organisent en cycles récurrents (Berry et al., 2020; Kryger et al., 2021). Ces **stades** se caractérisent par des activités cérébrales et extra cérébrales spécifiques qui peuvent se mesurer par une polysomnographie. Une polysomnographie comprend au minimum un **électroencéphalogramme** (EEG) permettant d'enregistrer l'activité cérébrale, un **électro-oculogramme** (EOG) permettant d'enregistrer les mouvements oculaires, et un **électromyogramme** (EMG) permettant d'enregistrer le tonus musculaire. Ainsi, on peut découper une nuit en succession de différents stades comprenant le **sommeil lent** (divisé en trois stades : N1, N2 et N3) et le **sommeil paradoxal** (**Figure 16**) :

- L'endormissement est généralement précédé d'un état qualifié d'éveil calme au cours duquel l'individu est relaxé, les yeux fermés. L'activité cérébrale est alors caractérisée par des oscillations alpha (8-12 Hz), prédominant dans les régions postérieures. Dans la mesure où le sommeil n'est pas encore initié, les capteurs extra cérébraux indiquent qu'il existe un tonus musculaire et que des mouvements oculaires ou des clignements sont présents.
- La phase initiale du sommeil (sommeil lent stade 1, **N1**) correspond à l'endormissement. Progressivement, le rythme alpha va diminuer pour laisser apparaître un rythme cérébral plus lent, correspondant à des **oscillations thêta** (4-7 Hz), sur lequel des pointes vertex peuvent apparaître sur les électrodes centrales. Ce ralentissement cérébral s'accompagne d'une diminution des mouvements oculaires avec perte des clignements. On peut observer des mouvements de roulement oculaire et les muscles se relâchent.
- Le stade 2 du sommeil lent (**N2**) est caractérisé par des figures électrophysiologiques caractéristiques. D'une part, la présence de **complexes K** correspondant à des ondes amples biphasiques d'une durée supérieure à 0.5 seconde. D'autre part, des **fuseaux de sommeil** (ou *spindles*) correspondant à des oscillations rapides dans la bande de

fréquence sigma (12-16 Hz) sur une durée pouvant aller de 0.3 à 1 seconde. Ces figures surviennent sur un rythme de fond largement dominé par la bande de fréquence **thêta** mais des courtes périodes d'oscillations delta (0.5-4 Hz) peuvent être observées (<50% du temps).

- Le stade ultime du sommeil lent (stade 3, **N3**) se définit par une prédominance d'**oscillation delta** dans le rythme de fond (>50% du temps pour le différencier du N2). Ces oscillations delta correspondent à des ondes lentes et amples.
- Enfin, le cycle se termine par le **sommeil paradoxal**. Cet état se caractérise par une **activité cérébrale spécifique en dent de scie évoluant sur la bande de fréquence thêta**. Plus remarquablement, le sommeil paradoxal se caractérise par la **perte complète du tonus musculaire** (hormis des *twitches* correspondant à des mouvements musculaires phasiques) et la présence de **mouvements oculaires rapides** (qui lui a donné son nom en anglais de *rapide eye movement stage*).

Classiquement, une nuit se divise en environ 5% de N1, 55% de N2, 20% de N3 et 20% de sommeil paradoxal, avec des cycles alternant sommeil paradoxal et sommeil lent toutes les 90 minutes en moyenne. Il est habituel d'observer une dominance de sommeil lent en début de nuit (comparativement au sommeil paradoxal) avec une inversion du ratio en fin de nuit. Afin de produire un hypnogramme (répartition des différents stades du sommeil au cours d'une nuit), des recommandations internationales élaborées par l'académie américaine de la médecine du sommeil définissent des critères pour attribuer à chaque période de 30 secondes d'enregistrement de polysomnographie un stade (Berry et al., 2020).

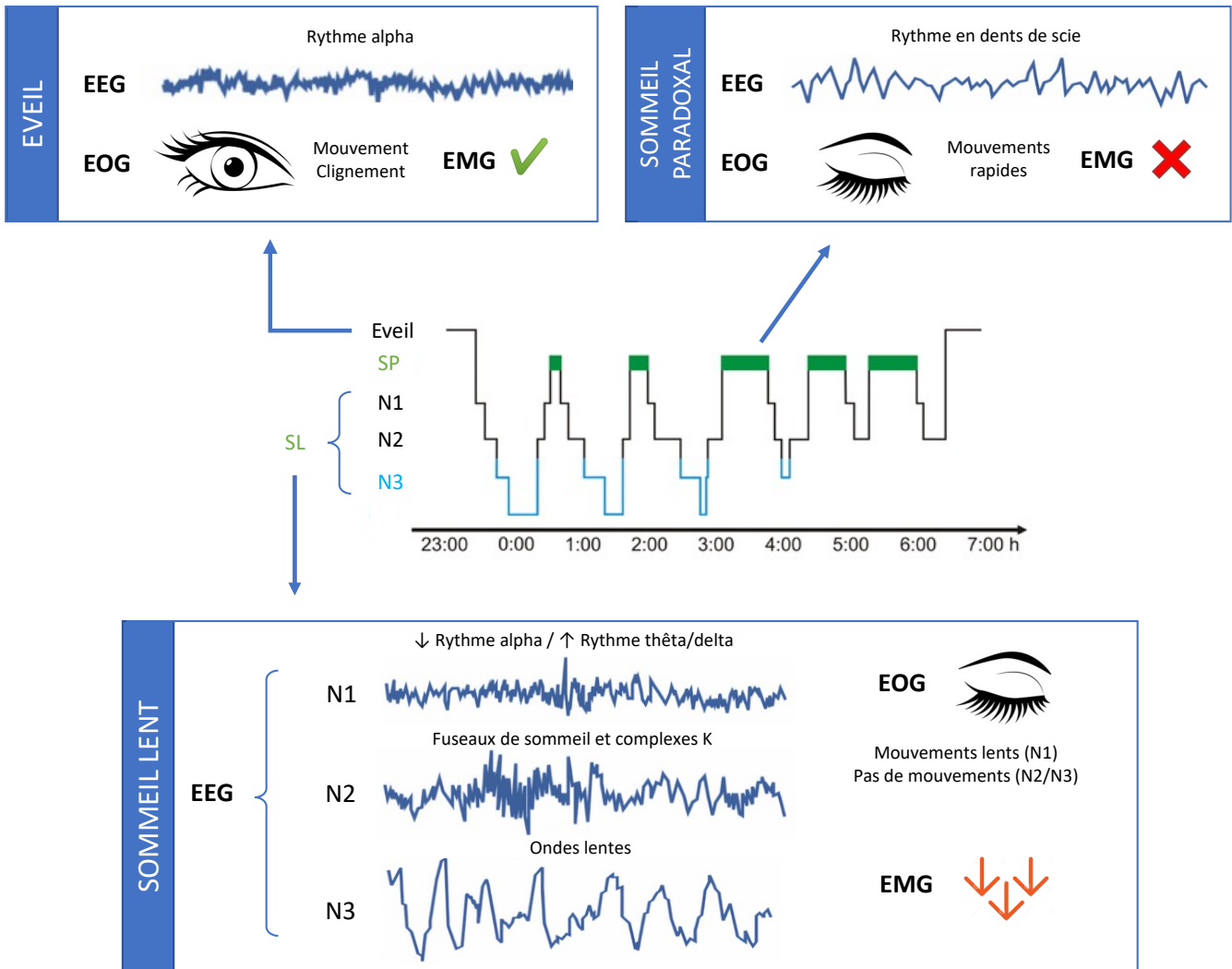


Figure 16. Les stades du sommeil. Hypnogramme (au centre) représentant les cycles au cours d'une nuit. Dans les rectangles bleus, sont représentées les caractéristiques (électroencéphalographique – EEG, électro-oculographique – EOG, et électromyographique – EMG) de l'éveil, du sommeil lent (SL) et du sommeil paradoxal (SP). Figure adaptée de Feld & Diekelmann, 2015 et Lacaux, 2021.

Longtemps considéré essentiel exclusivement pour la restauration physique, la régénération cellulaire ou encore la croissance, **le sommeil est maintenant reconnu comme impliqué dans plusieurs fonctions cognitives** (Hobson & Pace-Schott, 2002). En particulier, le rôle du sommeil dans la mémoire a beaucoup été documenté tant chez le rongeur que l'homme. Il semble intervenir pour consolider les souvenirs mais également les transformer qualitativement afin d'intégrer des nouveaux souvenirs à la mémoire préexistante et de générer de nouvelles idées. La partie suivante vise à détailler ces processus mnésiques modulés par le sommeil et les mécanismes cérébraux qui les sous-tendent.

5.2 Le sommeil dans la mémoire

Consolidation des souvenirs

Même si sa place est encore débattue dans quelques études (Mantua, 2018; Nemeth et al., 2021; Pan & Rickard, 2015; Vertes & Siegel, 2005), le rôle bénéfique du sommeil dans la mémoire est maintenant largement accepté. De nombreuses études ont associé le sommeil à des processus de **consolidation mnésique**. La consolidation est une étape importante de la mémorisation puisqu'elle permet de **transformer une trace mnésique en souvenir stable qui prend alors une représentation durable dans notre système mnésique**. Elle peut s'appliquer à la mémoire déclarative (i.e., regroupant la mémoire épisodique reliée à un contexte et la mémoire sémantique en référence aux connaissances générales) ou procédurale (i.e., mémoire permettant d'acquérir des automatismes comme faire du vélo) (Diekelmann et al., 2010; Dudai, 2012; Hoedlmoser et al., 2022; Klinzing et al., 2019; Paller et al., 2021; Peigneux et al., 2001; Rasch & Born, 2013). Dans la suite de cette introduction, nous nous intéressons particulièrement au lien entre le sommeil et la mémoire déclarative qui constitue un système mnésique pertinent pour étudier la résolution de problèmes avec les réseaux sémantiques.

Pour rendre compte du rôle du sommeil dans la consolidation mnésique, plusieurs modèles ont été proposés. Le **modèle de « active system consolidation »**, (**Figure 17**) est probablement celui qui est le plus accepté dans les études (Born & Wilhelm, 2012; Buzsáki, 1998; Diekelmann et al., 2010; Klinzing et al., 2019; Rasch & Born, 2007). Ce modèle repose sur la communication entre deux systèmes qui fonctionnent en parallèle : (i) un système de stockage à court terme des informations (représenté par l'hippocampe) ; et (ii) un système de stockage à long terme des informations (représenté par le néocortex). Lors de la veille, de nouvelles informations peuvent être encodées de manière simultanée dans les deux systèmes. Pendant le sommeil, notre cerveau est coupé de l'environnement et des stimuli extérieurs, bloquant ainsi l'encodage de nouvelles informations. Cette période, libérée des interférences, paraît donc particulièrement propice à la consolidation des souvenirs. Pendant le sommeil, l'hippocampe va réactiver de manière répétée des traces mnésiques correspondant aux expériences récentes. C'est par un dialogue entre l'hippocampe et le néocortex que les souvenirs seraient progressivement consolidés. Ce modèle permet à la fois d'intégrer le sommeil comme acteur dans la consolidation mnésique tout en préservant une

forme de stabilité des informations qui y sont déjà présentes (Buzsáki, 1989). En l'absence de réactivation, les traces mnésiques peuvent être potentiellement oubliées. Cette idée rejoint celle d'un modèle alternatif (« *the synaptic homeostasis hypothesis* ») (Tononi & Cirelli, 2006, 2014) dans lequel le sommeil permettrait d'éliminer les connections neurales faibles pour ne retenir que les plus fortes. Dans ce modèle, le sommeil permet une gestion efficace des souvenirs.

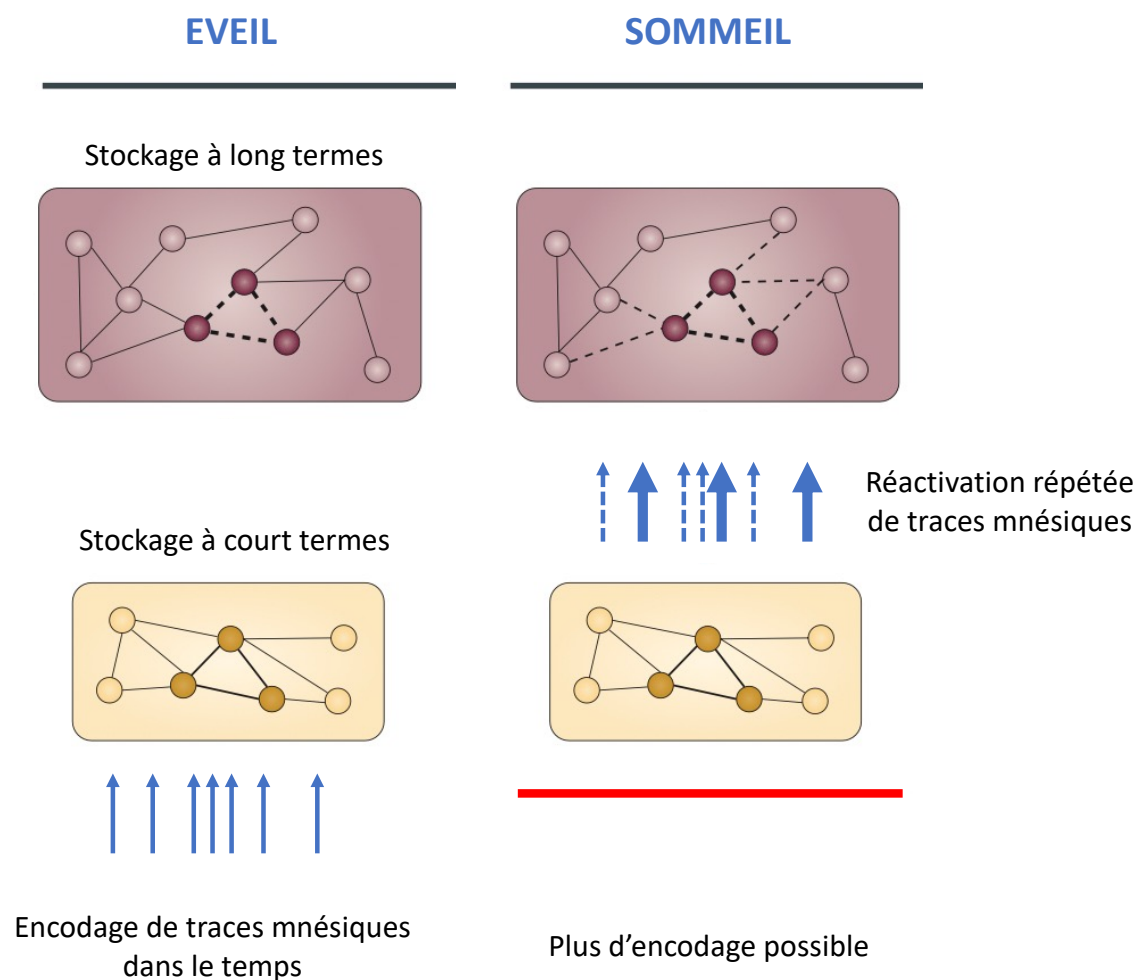


Figure 17. Active system consolidation model. A l'éveil (à gauche), des traces mnésiques (flèches bleues) sont encodées et stockées dans le système à court termes (hippocampe). Pendant le sommeil (à droite), l'encodage d'informations extérieures n'est plus possible. Certaines traces sont réactivées (flèches bleues larges et pleines) permettant d'enclencher un dialogue entre l'hippocampe et le système de stockage à long termes (néocortex) à l'origine d'une consolidation mnésique. Figure adaptée de Diekelmann et al., 2010.

L'étude des mécanismes cérébraux impliqués dans la consolidation mnésique a permis d'identifier des corrélats électrophysiologiques en accord avec ce modèle. La description des réactivations mnésiques hippocampiques associées aux *sharp wave ripples* chez le rongeur constitue une avancée majeure dans la compréhension des mécanismes cérébraux impliqués dans la consolidation mnésique pendant le sommeil (Ólafsdóttir et al., 2018; O'Neill et al., 2010; Wilson & McNaughton, 1994). Ces décharges d'activité neurale à haute fréquence observées dans l'hippocampe sont en liens étroits avec les performances mnésiques (Ego-Stengel & Wilson, 2010; Girardeau et al., 2009). Les *sharp wave ripples* (naissant dans l'hippocampe) se forment dans les dépolarisations rapides des fuseaux de sommeil (témoignant de l'activation de boucles thalamo-corticales), qui sont eux-mêmes synchronisés par les ondes lentes (naissant au niveau cortical) (Battaglia et al., 2004; Peyrache et al., 2011; Siapas & Wilson, 1998; Sirota et al., 2003) (**Figure 18**). La synchronisation de ces trois événements oscillatoires supporte le **dialogue hippocampo-cortical** dans les processus de consolidation en mémoire déclarative permettant **l'échange d'information et le transfert de la trace mnésique afin de la stabiliser au sein de la mémoire à long terme** (Girardeau & Lopes-dos-Santos, 2021; Maingret et al., 2016).

Ces observations ont été initialement faites chez le rongeur, car l'observation des *sharp wave ripples* et des réactivations mnésiques associées chez l'homme nécessitent des méthodes invasives. Cependant, plusieurs arguments indirects plaident pour l'existence des réactivations de traces mnésiques hippocampiques pendant le sommeil lent chez l'homme. En effet, plusieurs études ont montré que la synchronisation des ondes lentes et des fuseaux de sommeil était associée à une meilleure consolidation mnésique chez l'homme (Helfrich et al., 2018; Mikutta et al., 2019; Mölle et al., 2011; Muehlroth et al., 2019). D'autres études utilisent la méthode de réactivation ciblée de la mémoire (« *Targeted memory reactivation* », TMR) : cette méthode se base sur la présentation d'un stimulus pendant le sommeil (qui a été associé à l'apprentissage ou l'encodage d'une information pendant la veille) et qui permettrait de déclencher la réactivation du souvenir associé au stimulus pour le consolider (Oudiette & Paller, 2013; Schouten et al., 2017). Une méta-analyse d'études utilisant cette méthode a montré que lorsque la TMR était appliquée pendant le stade N3 ou N2, les souvenirs associés au stimulus étaient significativement mieux rappelés que ceux qui n'avaient pas été indicés (Hu et al., 2020). Cet effet n'était pas observé quand la TMR était appliquée pendant le

sommeil paradoxal. En plus de confirmer les effets positifs de la TMR sur la consolidation mnésique, des études récentes ont pu établir que le traitement des indices sensoriels liés à l'apprentissage était associé, pendant le sommeil, à des activités oscillatoires en EEG intracrânien (Creery et al., 2022) ou des activités en IRM fonctionnelle (Rasch et al., 2007; Shanahan et al., 2018) localisées au niveau de l'hippocampe. L'ensemble de ces études suggère que les mécanismes observés chez les rongeurs sont préservés chez l'homme.

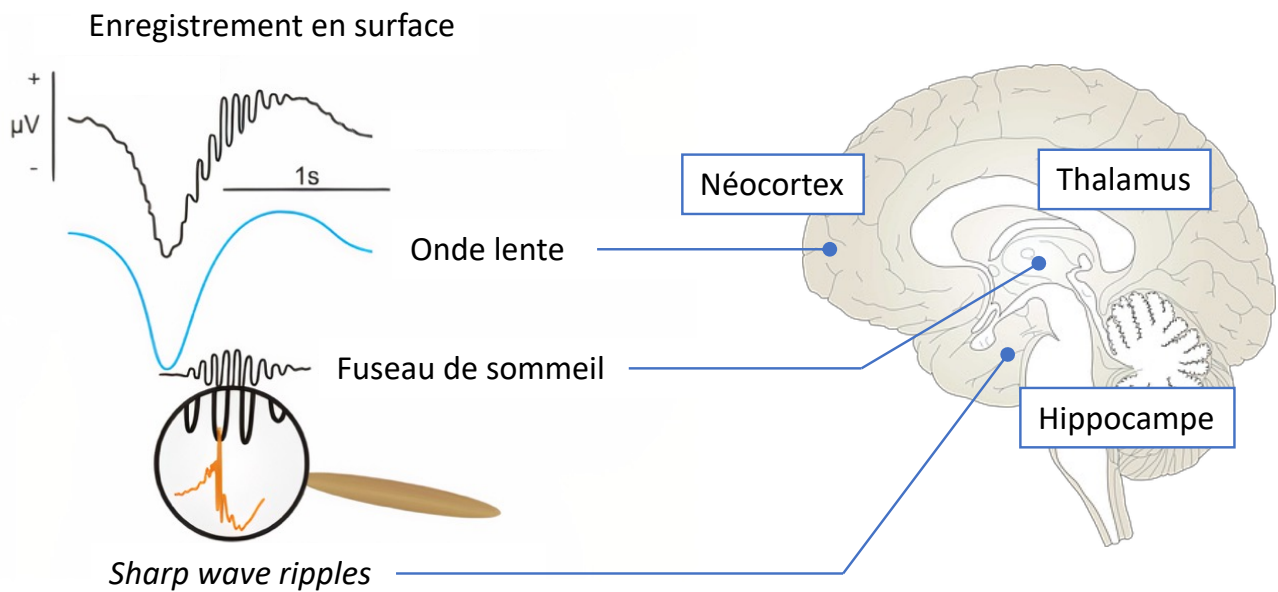


Figure 18. Électrophysiologie de la consolidation mnésique pendant le sommeil. La synchronisation des *sharp wave ripples* (hippocampiques) avec les fuseaux de sommeil (thalamiques) induite par les ondes lentes (néocorticales) permet le dialogue hippocampo-cortical à l'origine des processus de consolidation mnésique. Figure adaptée de Ólafsdóttir et al., 2018.

Ainsi, le rôle du sommeil dans la consolidation en mémoire a été associé à des événements électrophysiologiques (*sharp wave ripples*, fuseaux de sommeil et onde lentes) générés par différentes structures cérébrales (respectivement, l'hippocampe, les boucles thalamo-corticales et les régions néocorticales notamment préfrontales). Leur synchronisation au cours du sommeil permet un dialogue efficace entre l'hippocampe (supportant la réactivation mnésique) et le néocortex (permettant l'intégration mnésique à long terme) aboutissant à une consolidation du souvenir. L'ensemble de ces figures électrophysiologiques sont caractéristiques du sommeil lent (notamment des phases N2 et N3), plaçant le sommeil lent comme l'acteur principal dans la consolidation mnésique.

Transformation des souvenirs

En plus de consolider les souvenirs, il a été également proposé par plusieurs modèles théoriques que **le sommeil participe à la réorganisation des souvenirs et à leur modification qualitative** (Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). Cette réorganisation mnésique suggère que **de nouvelles connaissances peuvent être générées sans avoir été rencontrées, encodées ou apprises préalablement dans la journée et naître d'une recombinaison de souvenirs présents en mémoire**. L'étude des faux souvenirs apportent des arguments en faveur de l'hypothèse de remaniements des souvenirs. Un individu peut après avoir dormi créer des faux souvenirs témoignant d'une recombinaison de vrais souvenirs. Le paradigme de Deese-Roediger-McDermott (Deese, 1959; Roediger & McDermott, 1995) évalue la présence de faux souvenirs. Dans cette tâche, une liste de mots d'un même champ sémantique est présentée au participant (e.g., école, professeur, cartable, ...) puis de nouveaux mots appartenant à la même catégorie (e.g., classe) mélangés aux mots de la liste sont présentés. Le sujet doit déterminer si chaque mot faisait réellement partie de la liste initiale ou non. Plusieurs études ont montré que le sommeil augmentait la proportion de faux souvenirs (i.e., de mots dans le même champ sémantique mais non présents dans la liste initiale) (Diekelmann et al., 2010; McKeon et al., 2012; Pardilla-Delgado & Payne, 2017; Payne et al., 2009). Bien que minoritaire, il est à noter que d'autres études n'ont pas trouvé d'effets significatifs du sommeil (Fenn et al., 2009) dans ce paradigme et même parfois des effets inverses (Diekelmann et al., 2008). Cependant, une méta-analyse de l'ensemble de ces études a pu mettre en évidence des facteurs pouvant influencer le rôle du sommeil dans la production de faux souvenirs, notamment les modalités d'évaluation (rappel libre ou reconnaissance) et le nombre de mots inclus dans la liste initiale (Newbury & Monaghan, 2019). Dans cette étude, l'effet du sommeil sur l'augmentation des faux souvenirs était observé en condition de rappel libre et lorsque la liste de mot était courte. Ces résultats soutiennent l'idée que le sommeil permet de faciliter les associations d'idées à partir de liste de mots réduites qui forme le faux souvenir.

Les mécanismes par lesquels le sommeil permettrait cette réorganisation mnésique sont encore non élucidés et savoir s'ils sont associés à un stade du sommeil particulier reste une question ouverte. Les modèles théoriques tendent à présenter le sommeil paradoxal comme le stade principalement associé à ces processus de réorganisation mnésique

(Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). En effet, **le sommeil paradoxal a été associé à un état mental d'hyper-associativité qui permettrait de faciliter les connexions entre des souvenirs éloignés**. Cette hypothèse spéculative est initialement développée à partir des études ayant analysé les contenus oniriques pendant le sommeil. En effet, le rêve constituerait une fenêtre sur le contenu des pensées pendant le sommeil (Windt, 2013) et pourrait donc refléter les mécanismes qui s'opèrent dans les différents stades de sommeil (Edwards et al., 2013; Vallat et al., 2022). Il est classique de décrire les rêves survenant au cours du sommeil paradoxal comme étant le résultat d'une combinaison d'expériences récentes et anciennes pour former un nouveau scénario (Malinowski & Horton, 2021; Wamsley et al., 2010; Wamsley & Stickgold, 2010). Les rêves du sommeil paradoxal sont souvent longs (Antrobus, 1983; Casagrande et al., 1990; Foulkes, 1964), plus marquants, hallucinatoires (Hobson & Stickgold, 1994; Zadra et al., 1998), métaphoriques (Malinowski & Horton, 2021) et émotionnellement intenses (Smith et al., 2004; Stickgold et al., 2001), comparativement aux rêves survenant en sommeil lent. De plus, ils présentent souvent des bizarreries, incluant des éléments étranges, des situations incongrues ou discontinues (Hobson, 1997; Hobson & Stickgold, 1994; Mamelak & Hobson, 1989). De manière intéressante, ces bizarreries ne semblent pas aléatoires mais plutôt suivre un schéma associatif (Rittenhouse et al., 1994) (e.g., une piscine se transforme soudainement en une plage, un élément lié sémantiquement par le concept de l'eau). Malinowski et al. ont développé un questionnaire permettant de capturer l'hyper-associativité des rêves à partir de trois composantes : le sentiment de bizarrerie secondaire à l'association de souvenirs incongrus, la combinaison en une même situation de plusieurs éléments provenant de moments de vie différents, et le caractère métaphorique du rêve avec les événements de vie actuels (Malinowski & Horton, 2021). Ce questionnaire a permis de décrire des rêves de début de nuit (période dominée par le sommeil lent) comme concrets et reliés à la vie présente mais également des rêves de fin de nuit (période dominée par le sommeil paradoxal) comme plus émotionnels, personnels, bizarres, métaphoriques et impliquant des souvenirs du passé éloigné. Ainsi, l'étude des rêves a permis d'établir un lien indirect et hypothétique entre le sommeil paradoxal et un état d'hyper-associativité. Ce lien est aussi étayé par la description des ondes ponto-géniculo-occipitales (PGO) observées de manière intermittente pendant le sommeil paradoxal, souvent synchrones avec les mouvements oculaires rapides. Comme leur nom l'indique, les ondes PGO correspondent à des décharges originaires du pont qui se

propagent jusqu'au cortex occipital en passant par le thalamus (Bizzi & Brooks, 1963; Gott et al., 2017; Jouvet et al., 1959). Plusieurs auteurs ont proposé que ces ondes aléatoires généreraient les rêves en sommeil paradoxal (Hobson, 1997; Hobson et al., 2000; Hobson & Friston, 2012). Potentiellement, les ondes PGO pourraient permettre de réactiver plusieurs traces mnésiques différentes de manière aléatoire, créant ainsi des associations inédites entre différents souvenirs (Hobson & Friston, 2012; Lewis et al., 2018).

L'hypothèse selon laquelle le sommeil paradoxal est un état d'hyper-associativité est renforcée par d'autres arguments indirects. Le premier argument provient des propriétés neuropharmacologiques spécifiques du sommeil paradoxal. En effet, le sommeil paradoxal est caractérisé par un niveau d'acétylcholine élevé qui favoriserait la plasticité par remodelage synaptique (dégradation d'anciennes synapses et formation de nouvelles) et donc la connexion entre différentes représentations mnésiques (Hasselmo, 1999; Rasmusson, 2000). Le deuxième argument s'est construit sur deux approches expérimentales utilisant une tâche d'amorçage sémantique (Carr & Nielsen, 2015; Stickgold et al., 1999). Dans cette tâche, les sujets devaient simplement déterminer si le mot affiché à l'écran était un vrai mot (e.g., chien) ou un faux mot (e.g., grampy). L'apparition du mot était précédée d'un autre mot (l'amorce) pouvant être faiblement ou fortement associé au mot (e.g., fidèle et os, respectivement). Ces études se basent sur la théorie du « *carry-over* » qui suggère que les propriétés du stade du sommeil dans lequel un individu est réveillé se maintiennent en partie pendant une courte période suivant le réveil (un concept qui se rapproche de celui de l'inertie du sommeil) (Dinges, 1990; Vallat et al., 2019). Les auteurs ont montré que l'effet d'amorçage (i.e., la rapidité à reconnaître le mot chien dans notre exemple) était différent selon le type d'amorce (sémantiquement proche ou éloignée) lorsque le sujet était réveillé en phase de sommeil paradoxal comparativement aux autres stades du sommeil et à la veille. Le sommeil paradoxal était associé à un plus grand effet d'amorçage lorsque l'amorce était un mot sémantiquement éloigné du mot à reconnaître et au contraire à un effet d'amorçage plus faible lorsque l'amorce était sémantiquement proche du mot à reconnaître (Stickgold et al., 1999), un pattern inverse de celui observé à l'éveil. Ces études suggèrent que les propriétés neuropharmacologiques du sommeil paradoxal sont favorables à la facilitation d'associations entre des concepts sémantiquement éloignés et la suppression d'autres plus évidentes. Cependant, ces études ont mis en évidence un lien négatif entre la durée passée en sommeil

paradoxal et l'amplitude de l'effet d'amorçage. Ces résultats contradictoires et peu répliqués ne sont pas suffisants pour asseoir le lien entre sommeil paradoxal et hyper-associativité.

En somme, **les preuves empiriques démontrant l'hyper-associativité du sommeil paradoxal sont rares**, laissant ce concept au stade de théorie cognitive, construite sur des preuves expérimentales indirectes. Cependant, même si la théorie sur l'hyper-associativité du sommeil paradoxal manque de preuves empiriques, elle permet de formuler des hypothèses sur le rôle facilitateur du sommeil dans la créativité et la résolution de problèmes. En effet, le concept d'hyper-associativité du sommeil paradoxal est décrit comme un état mental qui faciliterait une recombinaison de nos associations d'idées en mémoire permettant d'en créer de nouvelles. Cet état mental fait fortement écho aux théories associatives de la créativité (S. A. Mednick, 1962) et aux processus de restructuration au cours de la résolution de problèmes (Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994) développés dans les parties précédentes. **L'hyper-associativité supposée du sommeil paradoxal permettrait de générer des idées nouvelles et originales en créant ou modulant les connexions entre les idées en mémoire**, laissant entrevoir son rôle dans la résolution de problèmes créatifs à travers ces mécanismes associatifs.

5.3 Rôle du sommeil dans la résolution de problèmes

Apport des données expérimentales

Du fait de son rôle dans la consolidation/transformation des associations d'idées en mémoire, le sommeil pourrait faciliter la résolution de problèmes par la création de nouvelles associations d'idées (Mazzarello, 2000). Le sommeil apparaîtrait en théorie comme une période d'incubation idéale pour résoudre des problèmes. Cette idée est en partie illustrée par les récits ou anecdotes d'éminents chercheurs ou artistes expliquant que le sommeil leur a inspiré des découvertes majeures. L'exemple de August Kekulé illustre particulièrement bien le propos de cette thèse⁹. L'histoire raconte que ce célèbre chimiste a découvert la structure moléculaire du benzène pendant une vision apparue lorsqu'il somnolait au coin du feu pendant l'hiver 1961. La visualisation d'un serpent se mordant la queue lui a

⁹ Les propos de August Kekulé sont rapportés en début de cette partie.

permis d'imaginer une structure circulaire du benzène. Cette grande découverte qui a révolutionné l'industrie chimique est survenu pendant le sommeil sous la forme d'une nouvelle représentation du problème (i.e., pouvoir imaginer une structure moléculaire circulaire) et/ou d'un lien analogique avec l'image du serpent. Bien que d'autres histoires similaires existent dans le monde scientifique mais aussi artistique, le rôle facilitant du sommeil dans la résolution de problèmes créatifs et analogues reste encore débattu et ses mécanismes d'action encore incertains.

En effet, il existe **peu d'études ayant examiné l'impact du sommeil sur la résolution de problèmes et leur résultats hétérogènes ne permettent pas d'établir de conclusions robustes**. De plus, les quelques études montrant un effet du sommeil sur la résolution de problèmes ne démontrent pas formellement le rôle d'un stade en particulier et les questions des mécanismes d'action ne sont pas explorés. L'hétérogénéité des résultats à ce jour peut être en outre accentuée par la diversité des problèmes utilisés, qui peuvent être séparés en plusieurs catégories.

La première catégorie est composée de **problèmes créatifs classiquement associés à une méthode de résolution avec insight**. Ces problèmes sont utilisés car ils nécessitent en théorie un changement représentationnel du problème souvent associé au phénomène de Eurêka. La majorité des études utilisant ce matériel a utilisé un schéma expérimental classique où les performances d'un groupe avec sommeil sont comparées à celle d'un groupe contrôle qui ne dort pas. Ces études ne présentent pas de résultats harmonieux. Bejjamini et al. ont montré un effet positif du sommeil dans la résolution d'un problème visuo-spatial, en particulier médié par le sommeil lent (Bejjamini et al., 2014, 2021). Cet effet du sommeil lent est renforcé par une autre étude ayant utilisé la méthode de réactivation ciblée de la mémoire (TMR). Dans cette étude, la réactivation des problèmes par un stimulus sonore pendant le stade N3 au cours d'une nuit permet d'augmenter les performances de résolution le lendemain (Sanders et al., 2019). Bien que cette étude conforte le rôle du sommeil lent dans la réactivation des problèmes, elle ne permet pas de déterminer si son rôle est exclusif dans la facilitation de leur résolution. Notamment, les auteurs discutent le rôle potentiel du sommeil paradoxal qui fait suite à la réactivation des problèmes pendant le sommeil lent dans l'effet positif observé sur la résolution de problèmes. L'effet du sommeil paradoxal dans la

résolution de problèmes a été investigué par Cai et al. en utilisant la *Remote Associates Task* (Cai et al., 2009). Dans cette étude, les auteurs ont évalué l'effet d'une incubation (avec ou sans sommeil) sur les performances à ce problème. Le sommeil paradoxal était associé à de meilleures performances (comparativement au sommeil lent et l'éveil) uniquement si les solutions aux problèmes étaient exposées implicitement avant l'incubation par l'intermédiaire d'une tâche d'analogie indépendante (**Figure 19**). En l'absence d'exposition préalable, l'incubation n'avait pas d'effet sur les performances. Ce résultat a été partiellement répliqué par d'autres études mais en observant un effet positif du sommeil en général comparativement à l'éveil (Carlsson et al., 2019; Sio et al., 2013; Whitehurst et al., 2016; Zander et al., 2017), la différence entre sommeil lent et paradoxal n'ayant soit pas été explorée, soit non observée statistiquement. Plus anecdotiquement, l'implication du sommeil paradoxal a été aussi observée dans une étude utilisant le *carry-over* (Walker et al., 2002) : dans cette étude, les participants réveillés en sommeil paradoxal présentaient de meilleures performances à la résolution d'anagrammes que lors de réveils dans un autre stade de sommeil. Cependant, cette étude manque de consistance : les auteurs ne retrouvent pas de différence entre le groupe sommeil paradoxal et le groupe contrôle sans sommeil et le faible nombre d'anagrammes utilisés remet en question la robustesse statistique des analyses. En parallèle de ces publications, plusieurs auteurs ont affirmé que le sommeil n'influencait pas les performances aux problèmes classiquement associés à une résolution avec insight (incluant notamment des énigmes, les problèmes arithmétiques des allumettes, le problème des neuf points ou des huit pièces, des anagrammes, la *Remote Associates Task* ou encore des problèmes plus écologiques) (Brodt et al., 2018; Hołda et al., 2020; Landmann et al., 2016; Schönauer et al., 2018). L'absence d'un lien entre sommeil et résolution de problèmes était supportée pour certaines de ces publications, par des approches statistiques rigoureuses (modèle bayésien, calcul rigoureux de puissance a priori).

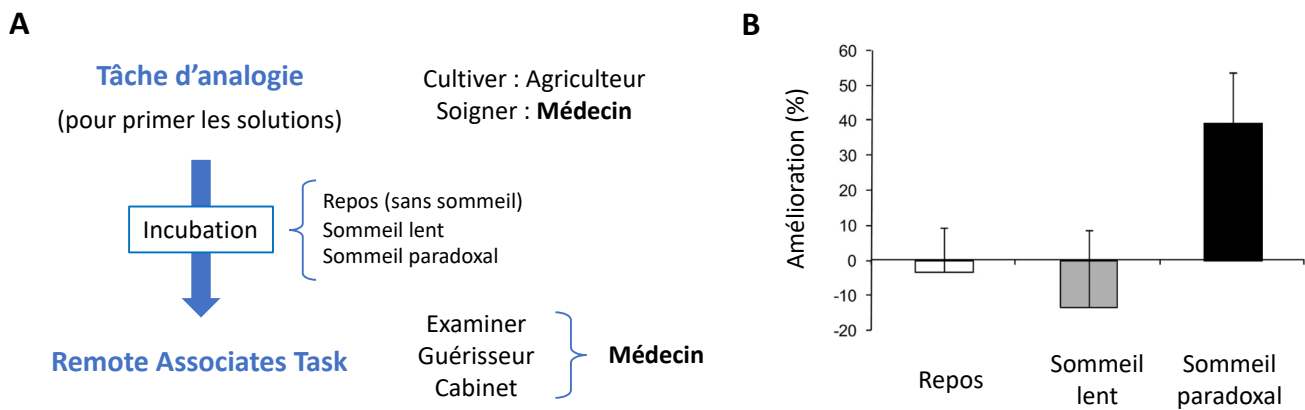


Figure 19. Le sommeil paradoxal dans la résolution de problème (Cai et al., 2009). A. Dans cette étude, les participants sont exposés préalablement aux solutions de *Remote Associates Task* par une tâche d'analogie indépendante. B. Les performances du groupe sommeil paradoxal sont significativement meilleures que les autres groupes, uniquement dans le cas où les solutions ont été amorcées avant la sieste. Figure adaptée de Cai et al., 2009.

En dehors de ces problèmes associés à une résolution avec insight, d'autres problèmes ont fait l'objet d'études explorant l'impact du sommeil sur leur résolution. Ils sont représentés par des **problèmes dont la résolution se base sur l'extraction d'une règle abstraite implicite** qui permet de réaliser une tâche bien plus facilement et rapidement que la stratégie initialement donnée au participant. Ils requièrent d'identifier une structure commune à travers différentes traces mnésiques. La tâche phare dans cette catégorie est la *Number Reduction Task* (NRT) (Thurstone & Thurstone, 1941) (**Figure 20A**). Dans cette tâche, des séries de huit chiffres (pouvant prendre les valeurs 1, 4 ou 9) conduisent les participants à trouver un chiffre final solution par succession d'opérations mentales respectant des règles précises. Ils doivent comparer les chiffres deux à deux en commençant avec les deux premiers chiffres puis en utilisant leur réponse avec le chiffre suivant et ainsi de suite jusqu'au chiffre final correspondant à la solution. Les règles sont simples : si les deux chiffres comparés sont identiques alors ils doivent répondre le même chiffre (e.g., 4-4, réponse : 4). Mais s'ils sont différents, ils doivent répondre le chiffre restant parmi les trois possibilités (e.g., 1-4, réponse : 9). Ce que les sujets ne savent pas, c'est qu'il existe une régularité cachée dans la séquence de chiffres donnée par le participant : la seconde réponse de la séquence est toujours la réponse finale. Trouver la règle cachée nécessite donc d'identifier une structure commune à travers toutes les traces mnésiques. En utilisant cette tâche, Wagner et al. ont montré qu'une nuit de sommeil permettait de doubler la proportion de sujet trouvant la règle cachée

uniquement lorsqu'ils étaient préalablement entraînés à la tâche (Wagner et al., 2004). Plusieurs études ont tenté de répliquer les résultats de cette étude. Debarnot et al. (Debarnot et al., 2017) ont centré leurs analyses en comparant l'effet du sommeil sur la découverte de la règle cachée entre deux groupes de sujets d'âges différents (âgé versus jeune). Leurs résultats tendent à répliquer les résultats de Wagner et al. uniquement dans le groupe de sujets jeunes (sous réserve de l'absence de groupe contrôle). Plus récemment, Lacaux et al. (Lacaux et al., 2021) ont montré un effet positif important du sommeil dans la découverte de la règle cachée, en ciblant particulièrement le stade N1 du sommeil lent (**Figure 20B**). L'effet du N1 dans cette tâche est soutenue par une étude ayant trouvé des résultats similaires en utilisant une période d'incubation calme propice à l'endormissement (Craig et al., 2018). Finalement, une étude a échoué à répliquer l'étude princeps de Wagner et al. (Yordanova et al., 2008).

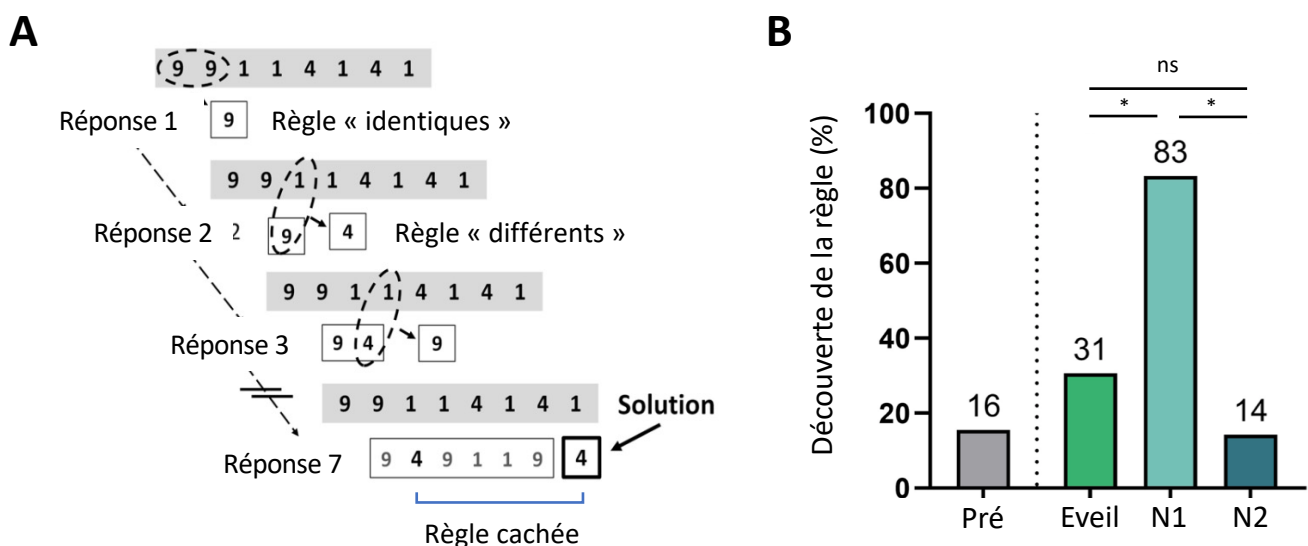


Figure 20. Effet du N1 dans la résolution de problèmes (Lacaux et al., 2021). A. *Number Reduction Task*. B. L'incubation contenant du N1 facilite la découverte de la règle cachée de la NRT. Figure adaptée de Lacaux et al., 2021.

Enfin, un dernier groupe de problèmes a fait l'objet d'étude dans le domaine du sommeil. Il regroupe les **problèmes qui suscitent un raisonnement par analogie**. Ces problèmes se rapprochent des problèmes précédents dans le sens où une règle abstraite implicite doit être extraite d'un problème initial afin de pouvoir l'appliquer dans une nouvelle situation. Une seule étude a directement questionné l'effet du sommeil sur la résolution de

problème analogue (Monaghan et al., 2015). Cette étude a montré que la résolution d'un problème cible était facilitée par une incubation comprenant du sommeil (comparativement à l'éveil) indépendamment de la performance à la résolution du problème source, et que cet effet était d'autant plus important que la durée de sommeil était grande. D'autres études ont suggéré l'effet bénéfique du sommeil sur la résolution de problèmes analogues de manière indirecte en rapportant une relation entre le sommeil et des capacités cognitives étroitement liées au raisonnement par analogie. Ces capacités incluaient par exemple la catégorisation (Djonlagic et al., 2009), l'intégration de relation entre plusieurs éléments en mémoire (Coutanche et al., 2013; Durrant et al., 2015; Lau et al., 2010, 2011) ou encore l'abstraction (Nieuwenhuis et al., 2013). Bien que dans ces études le lien entre sommeil et analogie soit indirect et hypothétique, elles permettent de renforcer l'étude princeps de Monaghan et al. suggérant le rôle facilitateur du sommeil dans la résolution de problèmes analogues. La question des mécanismes par lesquels le sommeil peut aider à résoudre des problèmes analogues reste à préciser, en particulier sur le rôle du sommeil lent et paradoxal.

Il est encore difficile d'explorer le rôle de chaque stade dans la résolution de problèmes. Le sommeil paradoxal est un stade difficile à investiguer. En effet, il est difficile d'obtenir du sommeil paradoxal pur (i.e., non précédé de sommeil lent), de l'étudier en condition expérimentale au cours d'une sieste (car c'est un stade qui peut apparaître tardivement dans le cycle) et d'avoir des marqueurs électrophysiologiques spécifiques. En effet, la puissance spectrale dans la bande de fréquence delta ou sigma est un bon reflet de la quantité d'ondes lentes ou de fuseaux de sommeil (respectivement) qui sont eux même très prédominants dans le sommeil lent. Pour le sommeil paradoxal, la puissance spectrale représentative pourrait être celle dans la bande de fréquence thêta mais celle-ci n'est pas spécifique et peut se retrouver dans les autres stades de sommeil. A ce jour, il n'existe pas d'algorithme fiable dans la détection des ondes en dents de scie retrouvées dans le sommeil paradoxal. Une alternative consisterait à quantifier les mouvements oculaires ou encore le temps passé en atonie musculaire.

Finalement, des modèles théoriques ont été développés pour rendre compte des mécanismes mis en jeu permettant d'établir des hypothèses sur les différents rôles des stades du sommeil dans la résolution de problèmes créatifs ou analogues.

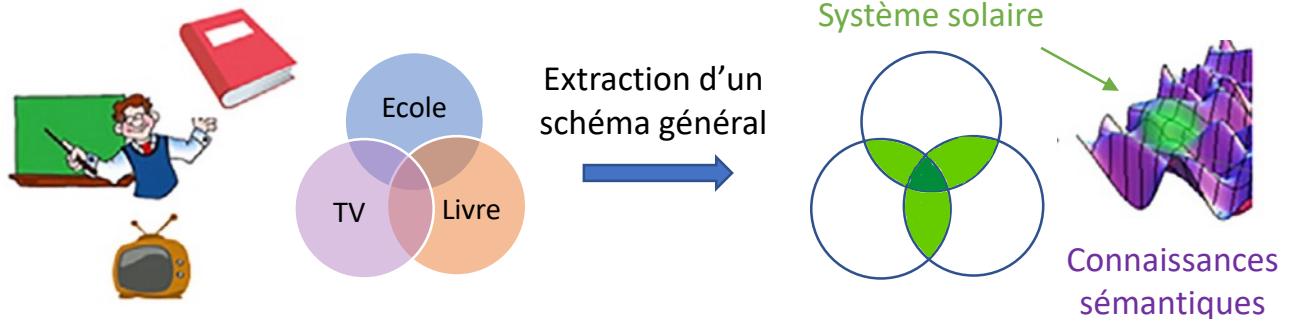
Apport des données théoriques

Les différents rôles du sommeil dans la mémoire (consolidation et transformation) ont été intégrés dans des **modèles théoriques pour rendre compte du sommeil dans la résolution de problèmes créatifs** (Deperrois et al., 2022; Feld & Diekelmann, 2015; Giuditta, 2014; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Lewis & Durrant, 2011; Llewellyn & Hobson, 2015; Rasch & Born, 2013). Ils permettent de proposer des hypothèses sur le rôle de chacun dans la résolution de problèmes.

Par exemple, le **modèle de Lewis et al.** (Lewis et al., 2018; Lewis & Durrant, 2011) permet d'illustrer l'intégration en mémoire des connaissances relatives au système solaire (**Figure 21**). Dans ce modèle, le sommeil lent permet l'abstraction d'un schéma général (« gist ») par consolidation des informations encodées dans la journée (« *information overlap to abstract model* », iOtA). Les traces mnésiques qui sont les plus répétées ou qui présentent le plus de zones de chevauchement entre elles vont être les plus consolidées. Les autres traces sont alors progressivement oubliées et laissent place à un schéma général abstrait. Dans l'exemple de la **Figure 21**, les traces mnésiques en rapport avec l'apprentissage du système solaire selon plusieurs modalités (média, documentaire, livres, école, ...) sont réactivées pendant le sommeil lent. Les informations qui se chevauchent (il est composé d'un soleil, de planètes, ...) forment le schéma général, tandis que les autres informations non pertinentes sont perdues. La formation de nouvelles connexions entre des schémas est rendu possible pendant le sommeil paradoxal grâce à ses caractéristiques lui conférant un état propice à l'hyper-associativité (« *broader form of the iOtA* », BiOtA). Ainsi, pendant le sommeil paradoxal une restructuration de la mémoire sémantique s'opère pour rapprocher et connecter des schémas du fait de similarités. Dans l'exemple proposé, le schéma général du système solaire préalablement extrait est rapproché du schéma général du système atomique. Ainsi le sommeil paradoxal et le sommeil lent présentent une action différente mais complémentaire sur les mécanismes de résolution de problèmes. Cette vision rejoint celle de théories insistant sur l'importance de l'alternance séquentiel du sommeil lent et paradoxal au cours des différents cycles d'une nuit (« *Sequential hypothesis* ») (Giuditta, 2014).

A.

Le sommeil lent

**B.**

Le sommeil paradoxal

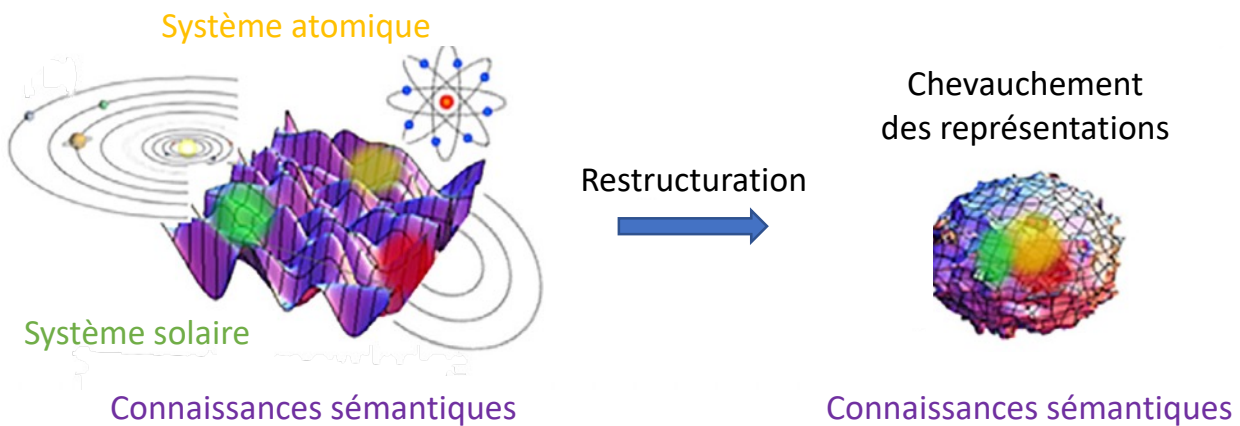


Figure 21. BiOtA model (Lewis et al., 2018). Le sommeil lent (A) permet d'intégrer des schémas généraux et abstraits à partir de connaissances acquises pendant la journée par un phénomène de consolidation mnésique. Le sommeil paradoxal (B) permet l'intégration et la recombinaison de ce nouveau schéma avec nos connaissances déjà présentes en mémoire. Figure adaptée de Lewis et al., 2018.

Récemment, d'autres auteurs ont illustré cette complémentarité du sommeil lent et paradoxal en modélisant leur rôle dans la mémoire à travers les rêves (Deperrois et al., 2022). Dans leur modèle (*perturbed and adversarial dreaming model*), les auteurs considèrent que les rêves jouent un rôle essentiel dans la formation des représentations corticales sémantiques, qui diffère selon le stade de sommeil. Lorsque le rêve survient pendant le sommeil lent, le rêve est dit « perturbé » : la représentation d'une image est formée à partir

d'un rêve représenté dans le modèle par une réactivation unique d'une image par l'hippocampe. Lorsqu'il survient pendant le sommeil paradoxal, le rêve est dit « contradictoire » : la représentation d'une image est alors formée à partir d'un rêve représenté dans le modèle par une réactivation de deux souvenirs aléatoires qui se combinent. Par la génération de données et l'apprentissage par intelligence artificielle, les auteurs suggèrent que la génération de nouvelles entrées sensorielles virtuelles par le biais du rêve contradictoire pendant le sommeil paradoxal est essentielle pour l'extraction de concepts sémantiques, tandis que la réactivation de souvenirs épisodiques par le biais du rêve perturbé pendant le sommeil lent permet de consolider des représentations latentes. En plus de renforcer la coopération du sommeil lent et paradoxal dans la mémoire, les auteurs donnent aux rêves (représentés par la combinaison créative de souvenirs épisodiques) un rôle essentiel dans la formation des représentations sémantiques.

Bien que ces hypothèses soient prometteuses, elles ont été très peu testées expérimentalement et restent à confirmer.

Synthèse

Résumé – Les modèles théoriques et les quelques études expérimentales portant sur le rôle du sommeil dans les processus mnésiques permettent d'établir des hypothèses sur les mécanismes par lesquels le sommeil pourrait faciliter la restructuration et la résolution de problèmes créatifs et analogues. Ils proposent que le sommeil lent permettrait d'extraire et former des schémas abstraits alors que le sommeil paradoxal permettrait de restructurer nos souvenirs et de promouvoir des nouvelles associations d'idées.

Questions irrésolues – Le rôle du sommeil dans la résolution de problèmes est encore incertain. Les données expérimentales permettant d'argumenter les hypothèses proposées par les modèles théoriques manquent et les questions des mécanismes par lesquels ils pourraient agir ne sont pas explorés dans les études. L'hypothèse de l'hyper-associativité du sommeil paradoxal n'a pas été directement explorée et reste aujourd'hui au stade de théorie cognitive. La méthode des réseaux sémantiques développée dans la partie 4 constitue une piste prometteuse pour éclaircir ces questions. La quantification des processus de restructuration par l'utilisation des réseaux permettrait d'évaluer l'impact du sommeil (et en particulier du sommeil paradoxal) sur nos associations d'idées relatives à un problème.

OBJECTIFS

Nous avons vu que la résolution de problèmes est une fonction clef pour notre quotidien mais dont les mécanismes neuro cognitifs sont encore incompris. Nous proposons dans cette thèse d'explorer deux mécanismes centraux (mais non exclusifs) permettant de résoudre des problèmes créatifs : la restructuration (i.e., la réorganisation de ses associations d'idées permettant de changer la représentation d'un problème) et le transfert par analogie (i.e., l'extraction d'un schéma d'analogie d'une situation familière pour l'appliquer à un problème analogue). Cette exploration s'articule en trois parties visant respectivement à répondre aux questions des mécanismes cognitifs, neuronaux et modulateurs (par le sommeil) impliqués dans la résolution de problèmes par le prisme de la créativité et du raisonnement par analogie.

OBJECTIF 1 - Mécanismes cognitifs -

Le premier objectif est d'explorer expérimentalement la restructuration dans la résolution de problèmes créatifs et analogues. Pour cela, nous proposons une nouvelle méthodologie originale basée sur la science des réseaux. Notre hypothèse est que, en comparant l'organisation de réseaux sémantiques à différents moments, on peut capturer et quantifier comment l'organisation des associations d'idées en mémoire sémantique évolue chez un individu donné. Ces changements peuvent refléter les processus de restructuration et permettre de les mettre en lien avec la résolution de problèmes. Les deux études expérimentales développées dans ce premier objectif ont été réalisées sur le même échantillon de participants, à l'aide de plusieurs tâches comportementales différentes visant à répondre à deux principales questions.

Étude 1A : Les changements dans l'organisation de la mémoire sémantique permettent-ils de résoudre un problème créatif ?

L'objectif de cette étude est d'étudier le **rôle mécanistique de la restructuration des associations d'idées dans la résolution de problèmes** afin d'établir pour la première fois une relation directe entre restructuration et résolution de problèmes créatifs. Pour cela, nous proposons :

- De développer une méthode originale qui utilise les réseaux sémantiques pour quantifier les processus de restructuration. Dans cette méthode, l'organisation individuelle des associations d'idées relatives à un problème est évaluée à deux moments clés : avant la présentation d'un problème et après sa tentative de résolution. Ces changements sont mesurés par des différences de métriques qui caractérisent les réseaux sémantiques. Ces différences de métriques permettent de quantifier les processus de restructuration au cours de la résolution du problème.
- D'explorer si la restructuration quantifiée par les réseaux sémantiques peut prédire le fait qu'un sujet trouve ou non la solution à une énigme.
- De répliquer cette étude avec un nouveau groupe de participants indépendants.

Notre hypothèse est que des changements dans l'organisation de nos associations d'idées en rapport avec un problème permettent de générer une représentation alternative de celui-ci qui peut conduire à le résoudre. Ces changements pourraient s'opérationnaliser à l'échelle globale du réseau sémantique ou bien de manière orientée, c'est-à-dire localement, dans une partie spécifique du réseau qui est critique pour atteindre une représentation pertinente pour résoudre le problème.

Étude 1B : Quel est le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes créatifs ?

L'objectif de cette étude est double : (i) confirmer le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes analogues, et (ii) explorer le rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes analogues. Pour cela, nous proposons :

- De répliquer les études de transfert selon plusieurs approches. La première approche consiste à répliquer les études utilisant le paradigme de la forteresse et de la tumeur avec quatre nouveaux problèmes. La deuxième approche propose une réplification de l'effet de transfert en utilisant une nouvelle tâche expérimentale. Ainsi, nous présentons le développement et la validation de cette nouvelle tâche utilisant un matériel figural adapté d'une tâche d'analogie développée par l'équipe. L'adaptation de cette tâche consiste à entraîner un schéma d'analogie dans un domaine donné et à mesurer comment cet entraînement peut faciliter l'application de ce schéma dans un domaine nouveau.
- D'explorer le rôle de la restructuration de la représentation mentale du problème initial dans la résolution d'un problème analogue. Pour répondre à cette hypothèse, nous testons si la restructuration du problème initial (quantifiée par les changements d'organisation des réseaux sémantiques, comme dans l'**étude 1A**) peut prédire le fait que le sujet trouve ou non la solution au problème analogue.

Notre hypothèse est qu'il y aura un plus fort taux de résolution d'un problème lorsqu'il est précédé d'un problème analogue, répliquant les études antérieures montrant un transfert par analogie dans la résolution de problèmes. Nous nous attendons à observer un transfert avec quatre nouveaux problèmes et avec notre nouvelle tâche construite sur un matériel non verbal. De plus, le deuxième objectif vise à explorer les mécanismes par lesquels le transfert peut avoir lieu. Notre hypothèse est que la restructuration représentationnelle du problème source permet d'intégrer de nouvelles informations et peut aider à construire un schéma d'analogie général. Ce schéma général étant primordial pour réaliser le transfert, nous pensons que la restructuration orientée vers la solution du problème source peut prédire la résolution d'un problème analogue, en particulier en condition spontanée.

OBJECTIF 2

- Mécanismes cérébraux -

Le deuxième objectif vise à explorer les mécanismes cérébraux impliqués dans la résolution de problèmes créatifs. Plus spécifiquement, nous visons à déterminer les variations oscillatoires en EEG associées aux capacités à combiner des concepts éloignés en mémoire et à la méthode de résolution avec insight.

Étude 2 : Quels sont les corrélats cérébraux impliqués dans la combinaison de concepts sémantiques éloignés et dans la résolution par insight ?

L'objectif de cette étude est d'explorer les corrélats neuronaux en lien avec la capacité à combiner des éléments sémantiquement éloignés et la résolution de problème avec insight. Ces deux processus sont associés à la résolution de problèmes créatifs et présente des liens indirects avec les processus de restructuration. Pour cela, nous proposons :

- D'utiliser la CAT (tâche adaptée de la *Remote Associates Task*) qui permet d'étudier simultanément ces deux phénomènes.
- D'utiliser une approche en EEG haute-densité pour déterminer le décours temporel de la puissance spectrale au cours de la résolution des essais afin de déterminer les dynamiques d'activations oscillatoires pendant la résolution du problème en fonction du rapport subjectif ou non d'un Eureka et de la distance sémantique entre les mots à combiner.
- De compléter cette approche par des reconstructions de sources afin d'argumenter les interprétations de nos résultats à la lumière des régions et réseaux corticaux identifiés dans les études en IRM existantes.

Notre hypothèse est qu'il existe des signatures électrophysiologiques spatio-temporelles et fréquentielles différentes pour les deux processus étudiés (i.e., l'éloignement sémantique des mots à combiner et la résolution avec insight). L'effet de l'éloignement

sémantique n'a jamais été exploré auparavant en EEG. Cependant, ayant un lien étroit avec des processus de créativité, nous nous attendons à observer des variations oscillatoires dans les bandes de fréquence alpha dans des régions frontales. Concernant l'effet d'une résolution avec insight, nous nous attendons à répliquer les résultats antérieurs en retrouvant l'implication de variations oscillatoires dans les bandes de fréquences alpha et gamma dans des régions temporales et postérieures. Enfin, nous nous attendons à ce que la localisation des sources des effets observés converge en partie avec les données des études d'IRM, permettant ainsi d'établir un pont entre ces deux approches.

OBJECTIF 3

- Mécanismes modulateurs -

Le troisième objectif vise à explorer si le sommeil aide à résoudre des problèmes en facilitant les processus de restructuration. Plus particulièrement, nous visons à explorer le rôle du sommeil paradoxal dans ces processus.

Étude 3 : Le sommeil paradoxal favorise-t-il la restructuration d'associations sémantiques relatives à un problème ?

L'objectif est d'établir un lien entre le sommeil, et en particulier le sommeil paradoxal, avec les processus de restructuration et la résolution de problèmes créatifs. Pour cela, nous proposons :

- D'insérer une période d'incubation entre deux tentatives de résolution d'un problème, et d'utiliser la méthode de quantification de la restructuration (réseaux sémantiques) développée dans l'objectif 1A pour évaluer l'impact de cette période d'incubation dans la réorganisation des associations d'idées relatives au problème.

- De comparer l'effet de cette phase d'incubation selon qu'elle comprend du sommeil sans sommeil paradoxal, ou du sommeil avec sommeil paradoxal, ou uniquement de l'éveil.
- D'explorer si l'effet du sommeil (et en particulier du sommeil paradoxal) sur la restructuration permet de faciliter la résolution d'un problème.

Notre hypothèse est que le sommeil paradoxal est associé à une plus grande restructuration liée à ses propriétés d'hyper associativité facilitant la modulation et la création d'associations d'idées. Puisque la restructuration a été proposé comme un mécanisme de résolution de problèmes, nous nous attendons à ce que le sommeil paradoxal améliore les capacités de résolution de problèmes en facilitant les processus de restructuration.

Chapitre 2

ETUDES EXPERIMENTALES

Partie 1 : Mécanismes cognitifs de la résolution de problèmes

Partie 2 : Mécanismes cérébraux de la résolution de problèmes

Partie 3 : Mécanismes modulateurs de la résolution de problèmes

Partie 1

Mécanismes cognitifs de la résolution de problèmes

Dans cette partie, nous visons à explorer le rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes créatifs ([étude 1A](#)) et le transfert par analogie ([étude 1B](#)) en utilisant la méthode des réseaux sémantiques. Ces réseaux sémantiques représentent comment sont organisées les associations d'idées relatives à un problème, reflétant comment l'individu se représente celui-ci. En quantifiant les changements d'organisation de ces associations d'idées, la restructuration du problème peut être mesurée et mise en lien avec sa résolution ou celle d'un problème analogue.

1.1 Cadre général

Ces deux études ont été réalisées sur une même population ayant réalisé plusieurs tâches expérimentales permettant de répondre aux deux objectifs. Cette population est composée de 99 sujets sains de langue maternelle française, âgés entre 18 et 38 ans. Ils ont réalisé une expérience de 4h durant laquelle ils devaient résoudre quatre problèmes (opérationnalisés par quatre énigmes : l'énigme de Zoé, de la Voiture, de Daniel, et du Bar) et réaliser des tâches de jugements d'associations sémantiques entre des paires de mots (afin de construire les réseaux sémantiques). Les énigmes étaient composées de deux couples d'énigmes analogues, c'est-à-dire que l'énoncé et la solution des énigmes d'un couple présentaient un schéma général commun (Zoé/Voiture et Daniel/Bar).

Les deux couples d'énigmes étaient présentés aux participants de manière successive selon une procédure expérimentale similaire (**Figure 22**). Cette procédure comprenait : (i) une tentative de résolution d'une énigme d'un couple (en condition *naïve*) en un temps limité ; (ii)

la réalisation de la tâche de jugements d'associations de mots (RJT) avant la présentation du problème initial et après la tentative de résolution ; (iii) la réponse à l'énigme initiale était alors donnée aux participants ; (iv) une tâche de distraction n'interférant pas avec les énigmes ; (v) une tentative de résolution de la deuxième énigme du couple (en condition *transfert*) en un temps limité. Cette procédure était répétée avec le deuxième couple d'énigmes après une pause et la réalisation d'autres tâches expérimentales indépendantes. L'étude de la restructuration dans résolution de problèmes créatifs (**étude 1A**) se focalise sur les deux premières étapes (énigme en condition *naïve* et RJT) et l'étude du transfert par analogie dans la résolution de problèmes analogues (**étude 1B**) se concentre sur les dernières étapes (RJT et énigme en condition *transfert*).

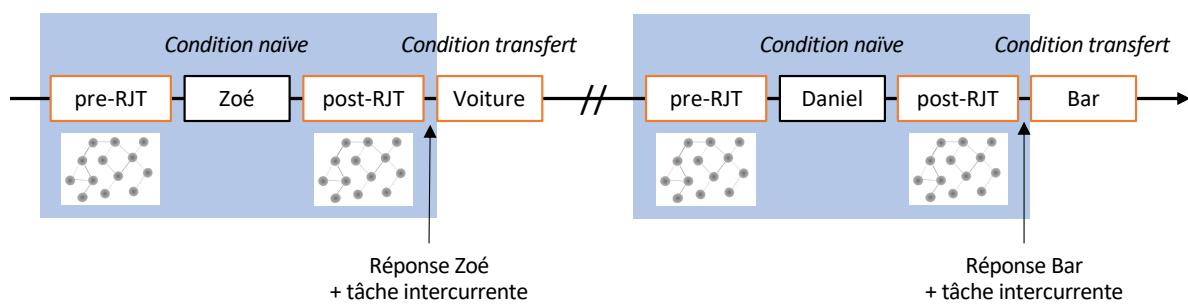


Figure 22. Cadre expérimental général. Dans cette figure, le couple Zoé/voiture est utilisé comme exemple. Les cadres bleus représentent le matériel utilisé pour l'étude 1A (l'énigme en condition *naïve* et les deux RJT avant et après). Le matériel encadré en orange représente celui utilisé pour l'étude 1B (l'énigme en condition *transfert* et les deux RJT relatives au problème initial).

1.2 Les changements dans l'organisation de la mémoire sémantique permettent-ils de résoudre un problème créatif ? (étude 1A)

Résumé détaillé

Introduction – La restructuration correspond à la capacité à modifier une représentation mentale d'un problème. D'après de nombreuses théories, elle constitue un mécanisme clef dans la résolution de problèmes en permettant la réorganisation de ses associations sémantiques en mémoire afin de générer une nouvelle représentation du problème menant à sa solution (Durso et al., 1994; Knoblich et al., 1999; Mumford et al., 1991; Öllinger et al., 2014). Bien que largement acceptées, ces théories manquent de preuves empiriques, en partie car le concept de restructuration n'a pas été opérationnalisé de manière quantifiable.

Les réseaux sémantiques constituent une méthodologie innovante pour comprendre des systèmes complexes tels que la mémoire sémantique (Baronchelli et al., 2013; Beckage & Colunga, 2016; De Deyne et al., 2017; Hills & Kenett, 2021; Solé et al., 2010). En utilisant des mots en rapport avec un problème, l'organisation des réseaux sémantiques (i.e., des associations d'idées relatives au problème) pourrait refléter la manière dont un individu se représente le problème. Une seule étude a utilisé la méthode des réseaux sémantiques dans la résolution de problèmes (Durso et al., 1994). En réalisant un réseau sémantique après la tentative de résolution d'un problème, cette étude a montré que les nœuds représentant des mots pertinents pour la résolution du problème étaient centraux uniquement chez les solveurs alors que des mots explicites du problème (mais sans lien avec la solution) étaient centraux chez les non-solveurs. Cependant, dans cette étude, les changements dans l'organisation des réseaux sémantiques n'ont pas été évalués puisque les auteurs n'ont pas construit de réseaux basal (e.g., avant la présentation du problème). La mémoire étant un système dynamique (Bassett & Sporns, 2017; Boccaletti et al., 2006; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Y. Kenett & Thompson-Schill, 2020; Schilling, 2005; Yee & Thompson-Schill, 2016), des changements dans son organisation peuvent être observés. Répéter des réseaux sémantiques avant et après la présentation d'un problème devrait nous permettre de mieux capturer et quantifier des changements dans les associations d'idées au cours de sa résolution, en reflétant comment sa représentation peut se modifier et se restructurer.

Objectif – L’objectif de cette étude est de quantifier la restructuration des associations d’idées relatives à un problème par les changements qui s’opèrent dans l’organisation de réseaux sémantiques, et mettre en lien ces changements avec la résolution du problème (**Figure 23**). Cet objectif a été conduit dans un groupe « *initial* » puis dans un groupe « *réplication* » incluant de nouveaux participants.

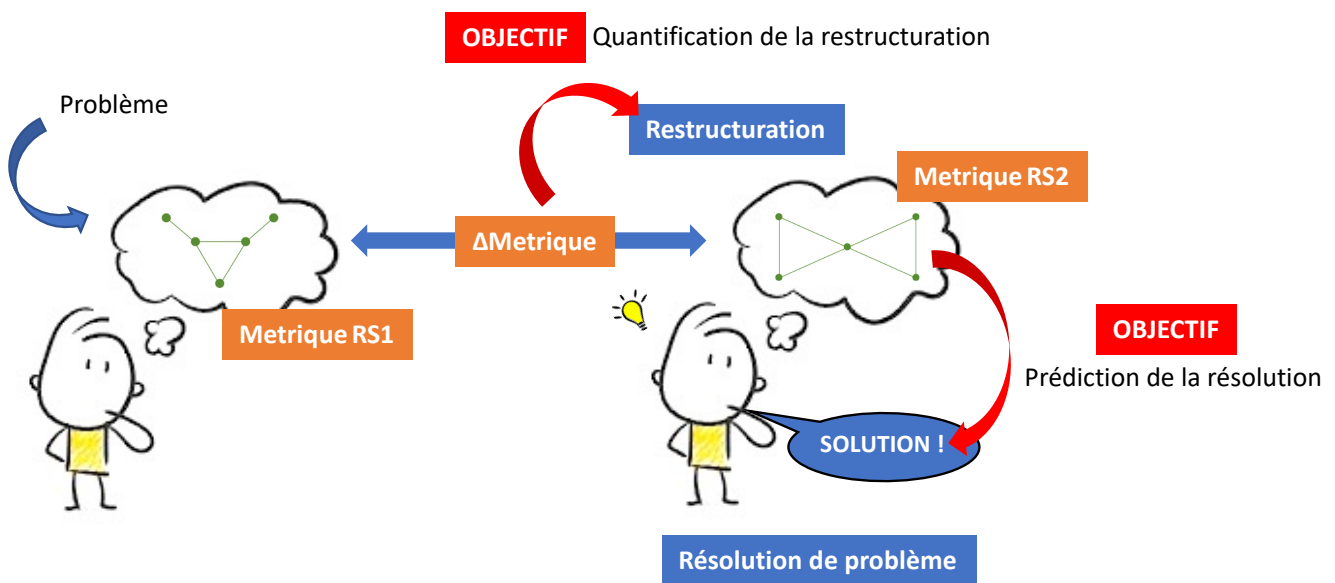


Figure 23. Objectifs de l’étude 1A. Quantifier la restructuration relative à un problème par les réseaux sémantique et la mettre en lien avec sa résolution. RS – réseau sémantique.

Méthode – Les participants ont été confrontés à plusieurs énigmes. Pour quantifier la restructuration, des réseaux sémantiques individuels ont été construits avant la présentation d’une énigme donnée et après sa tentative de résolution, en utilisant la méthodologie basée sur la tâche de jugement d’association de mots (RJT) (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019). Chaque RJT utilisait une liste mots spécifique à chaque énigme comprenant 20 mots en rapport le problème (son énoncé, a solution ou des mots neutres). Chaque réseau sémantique était donc constitué de 20 nœuds (i.e., les mots de la liste), reliés par des liens représentant la force d’association correspondant aux jugements de la RJT. Plusieurs métriques étaient calculées au sein de ces réseaux afin de quantifier leur organisation. La restructuration des réseaux était alors quantifiée par la différence de ces métriques entre les deux réseaux sémantiques d’une même énigme. Afin de démontrer le rôle

de la restructuration dans la résolution de problèmes, nous avons testé si ces changements individuels d'organisation des associations d'idées relatives au problème dans les réseaux sémantiques pouvait prédire le fait que l'individu trouve ou non la solution. Cette analyse a été réalisée dans deux échantillons indépendants (groupe *initial* : 99 participants, 4 énigmes, 2 énigmes/participant ; groupe *réplication* : 151 participants, 1 énigme).

Résultats – Résoudre le problème était significativement associé à des changements dans les réseaux sémantiques, ciblant en particulier les liens et les nœuds les plus pertinents à considérer pour résoudre le problème. Plus ces nœuds ou liens devenaient centraux ou forts dans le deuxième réseau sémantique (comparativement au premier), plus la probabilité de résoudre le problème augmentait. Nous avons répliqué ce résultat dans les deux échantillons indépendants.

Conclusion – Cette étude permet (i) de mettre en lien directement la restructuration avec la résolution de problèmes, et (ii) offre une nouvelle méthodologie (utilisant les réseaux sémantiques) pour quantifier les processus de restructuration.

Article

Cette étude a été réalisée en **collaboration** avec le Dr **Yoed Kenett** et la participation de Inès Maye (étudiante Master 1) et Marie Succimarra (étudiante Master 2) que j'ai co-encadrées et supervisées. Elle est formalisée par la rédaction de cet article qui est en cours de soumission et qui a fait l'objet de plusieurs communications (orales et affichées) en congrès international (congrès annuel de la *Cognitive Science Society* et de la *Society for the neuroscience of creativity*), lors de rencontre académique (ED3C scientific days, journée des doctorants de Sorbonne université) ou de vulgarisation scientifique (paroles de chercheurs).

Dynamic changes in semantic memory structure support successful problem-solving

Théophile Bieth^{1,2}, Yoed N. Kenett³, Marcela Ovando-Tellez¹, Alizée Lopez-Persem¹, Célia Lacaux^{1,4}, Marie Scuccimarra¹, Inès Maye¹, Delphine Oudiette^{1,4*} & Emmanuelle Volle^{1*}

Affiliation:

¹ Sorbonne University, Institut du Cerveau - Paris Brain Institute -ICM-, Inserm, CNRS, AP-HP Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, Paris, France

² Neurology department, Pitié-Salpêtrière hospital, AP-HP, F-75013, Paris, France

³ Faculty of Industrial Engineering and Management, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa 3200003 Israel

⁴ Sleep center, Pitié-Salpêtrière hospital, AP-HP, F-75013, Paris, France

* equal contribution

Corresponding authors:

Emmanuelle Volle (emmavolle@gmail.com)

Delphine Oudiette (delphine.oudiette@gmail.com)

Théophile Bieth (theo_bieth@hotmail.fr)

Key words:

Problem-solving, Semantic networks, Restructuring, Cognitive mechanism, Creativity

Abstract

While creative problem-solving is central in everyday life, its underlying mechanisms remain elusive. Restructuring (i.e., reorganization of problem-related representations) is considered as one such mechanism, yet empirical evidence supporting it is scarce. We investigated restructuring as a problem-solving mechanism, using network science methodology. We estimated participants' individual semantic memory network before and after attempting to solve a riddle (n=99). These networks represent the organization of solution-relevant and irrelevant terms as nodes, with edges representing the strength of relationship between them based on participants' relatedness judgments. Restructuring was quantified as the difference in semantic network metrics between pre- and post-solving phases. Successful problem-solving was predicted by a local semantic network restructuring, only in edges and nodes assessed as helpful to solve the riddle. These results were replicated in an independent sample (n=151). Our results shed new light on the mental restructuring in problem-solving and provide a new method to quantify it.

Statement of relevance

We constantly need to solve problems, be it at work, in our personal life, or to face societal challenges. Therefore, understanding how we solve problems and how we can facilitate this ability is crucial. However, the cognitive mechanisms underlying problem-solving remain elusive. A dominant theory states that one must restructure a problem to solve it. It presumably entails combining elements related to the problem in a new way or creating new connections between remote concepts stored in semantic memory. However, methodologies measuring this restructuring are lacking. Here, we used network science approaches to quantify how semantic associations between problem-related concepts are modified (restructured) after solving a riddle. We found that successful problem-solving relates to key changes in ones' network of semantic associations. By providing a tool to measure problem restructuring, our work opens the door for determining its neural underpinnings and the factors modulating such a process (e.g., sleep).

Introduction

In our daily life, we constantly deal with problems, ranging from the most mundane (e.g., what to cook for dinner given the ingredients at our disposal), to professional activities (e.g., how to reorganize our current plans to meet a new deadline), to major societal challenges (e.g., how to find innovative solutions against global warming). While the ability to solve problems is a critical skill for adapting to new situations and innovating, the mechanisms underlying the problem-solving process remain largely unknown. How do we find new solutions to problems that we never encountered before?

Among the problems we face each day, some are well-defined (e.g., playing chess). The initial state (i.e., the chess board) and goal state (i.e., checkmate) are clear, and the solver can apply a set of operations (i.e., chess moves) to reach the goal. However, for most of our problems (e.g., organizing work activities during the COVID-19 pandemic), the problem space is ambiguous. There are no heuristics or existing rules that could be applied to transform the initial state into the goal state (Newell & Simon, 1972). Such ill-defined problems (Reitman et al., 1964) thus require additional mental processes, which have been tightly linked to creative thinking (Cropley, 2006; Finke et al., 1992; Mumford et al., 1991). Ill-defined problem solving (or creative problem solving) often referred to insight solving, where the solution came to mind suddenly and effortlessly, with a “Eureka” phenomenon (Chu & MacGregor, 2011; Kounios & Beeman, 2014; Topolinski & Reber, 2010). They are thought to involve a restructuring of the initial problem mental representational space (Mumford et al., 1991), that presumably entails combining elements related to the problem in a new way or creating novel and unexpected connections between remote concepts in semantic memory (Mednick, 1962; Schilling, 2005). It ultimately allows the solver to change perspective, reframe the problem, or escape its implicitly imposed constraints (Ohlsson, 1984) and leads to creative associations (Chu & MacGregor, 2011; Mednick, 1962). For instance, consider the following problem: “A man walks into a bar and asks for a glass of water. The bartender points a shotgun at the man. The man says, ‘Thank you,’ and walks out” (Durso et al., 1994). The problem is ill-defined because the path to find the solution is left for participants to identify, and the goal state is vague. Solving this problem first requires asking the right question: in which context would a *shotgun* and a *glass of water* help somebody? Rather than relying on obvious associations

(e.g., *a glass of water* is related to thirst), solvers must fill the missing link between the relevant elements of the problem (*a shotgun* induces fear plus fear and drinking water are two remedies for hiccups). Restructuring one's existing semantic associations would allow to see this link and find the solution.

Although this hypothesis is intuitively satisfying, empirical evidence supporting it is surprisingly scarce (Danek et al., 2020; Durso et al., 1994; Öllinger et al., 2013). The assumption that solvers restructured their internal representation of the problem often stems from the mere fact that they found the solutions (circular argument), rather than from a direct measurement (Ash et al., 2009). Here, we propose to quantify problem restructuring, using tools from network science.

Network science is based on mathematical graph theory, offering quantitative tools to represent complex systems as networks (Siew et al., 2019). A growing amount of research has been applying network science methods to study cognitive systems, mainly focusing on memory and language (Hills & Kenett, 2021; Siew et al., 2019). Specifically, semantic memory networks (SemNets) represent elements of knowledge as nodes related to each other with edges of various strengths (Baronchelli et al., 2013; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Steyvers & Tenenbaum, 2005). They have been used to explore the organization of semantic memory (Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Collins & Loftus, 1975; Kumar, 2021; Siew et al., 2019), and how this organization relates to creativity (Benedek, Kenett, Umdasch, Anaki, et al., 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Y. N. Kenett, 2019; Y. N. Kenett et al., 2011, 2014; Y. N. Kenett & Faust, 2019; Ovando-Tellez et al., 2022). Importantly, Schilling has theoretically argued that insight solving occurs as a result of restructuring of the SemNet structure, through the creation of new links between nodes in semantic memory (Schilling, 2005). We propose that SemNets can be used to model how the elements of a new problem are semantically associated with one another in a person's mind and how changes in these associations predict successful problem solving (Y. Kenett & Thompson-Schill, 2020; Yee & Thompson-Schill, 2016).

Using the riddle presented above and SemNets, Durso et al. empirically demonstrated a restructuring of the solution-relevant semantic associations in SemNets of participants who solved the riddle compared to those who did not (Durso et al., 1994). In addition, they showed

how edges between nodes that are decisive to solving the riddle are gradually identified as critical. Currently, no replication of this study has been published. Additionally, the study of Durso et al. (Durso et al., 1994) did not explore SemNet structure at the individual level. Thus, applying an individual SemNet approach, recently developed in creativity research, would allow overcoming these limitations and better capture the restructuring of associations and problem representations related to successful creative problem solving (Benedek, Kenett, Umdasch, Anaki, et al., 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Ovando-Tellez et al., 2022).

Our study aims to explore the restructuring of SemNets as a cognitive mechanism underlying successful problem solving and characterize this restructuring using network science methodologies. We applied a novel SemNet method to estimate individual SemNets across two different time points: once before the presentation of a problem, operationalized as a riddle (such as the one described above), and again after an attempt to solve it. We hypothesized that individual changes in SemNet organization (i.e., restructuring) would predict successful problem solving. In particular, we hypothesized that edges or nodes that are the most relevant to the solution would become more connected or central in individual SemNets.

Methods

Participants

Ninety-nine native French speakers aged between 18 and 38 years old (mean age = 25.91 years, SEM = 2.60; 69 women) were included. All participants were healthy adults with no history of neurological and/or psychiatric illness and no psychoactive substance abuse. This sample was a sample of convenience. An approved ethics committee approved the study. All the participants gave their written informed consent and received 10€/hour as a monetary compensation.

Experimental procedure

Participants underwent a 4h-experiment during which they had to solve two riddles among four labeled “Zoe”, “Daniel”, “Car” and “Bar” riddles (**Figure 1**). For example, the Zoe

riddle states the following: “*Zoe throws a stone that lands in the sky. How is it possible and in which context?*” and the Bar riddle is the one used by Durso et al. (Durso et al., 1994) (**Table S1** and **S2**). Participants were first presented with one riddle and attempted to solve it during 10-min. Before and after this solving phase, participants performed the relatedness judgement task (RJT). After a 15-min break followed by various creativity tasks, participants were presented with a second riddle, following the exact same procedure as for the first one (RJT before and after a 10-min solving phase). Half of the participants worked on one set of riddles (Zoe/Daniel riddles), and another half worked on another set of riddles (Car/Bar riddles). The order of the riddles within the experimental design was counterbalanced among participants to ensure that neither positive (training) nor negative (fatigue) effects related to which riddle came first could interfere with the results (four possible combinations: Zoe/Daniel, n = 25, Daniel/Zoe, n = 24; Bar/Car, n = 25; and Car/Bar, n = 25).

All tasks were computed using the Psychopy software (Peirce et al., 2019) running on individual computers in a classroom dedicated to cognitive experiments (<https://institutducleveau-icm.org/fr/prisme-human-behavior-exploration-core-facility/>).

Task-related instructions were initially explained and repeated before the beginning of each task. During the 4h-experiment, participants performed additional separate tasks that are out the scope of this study.

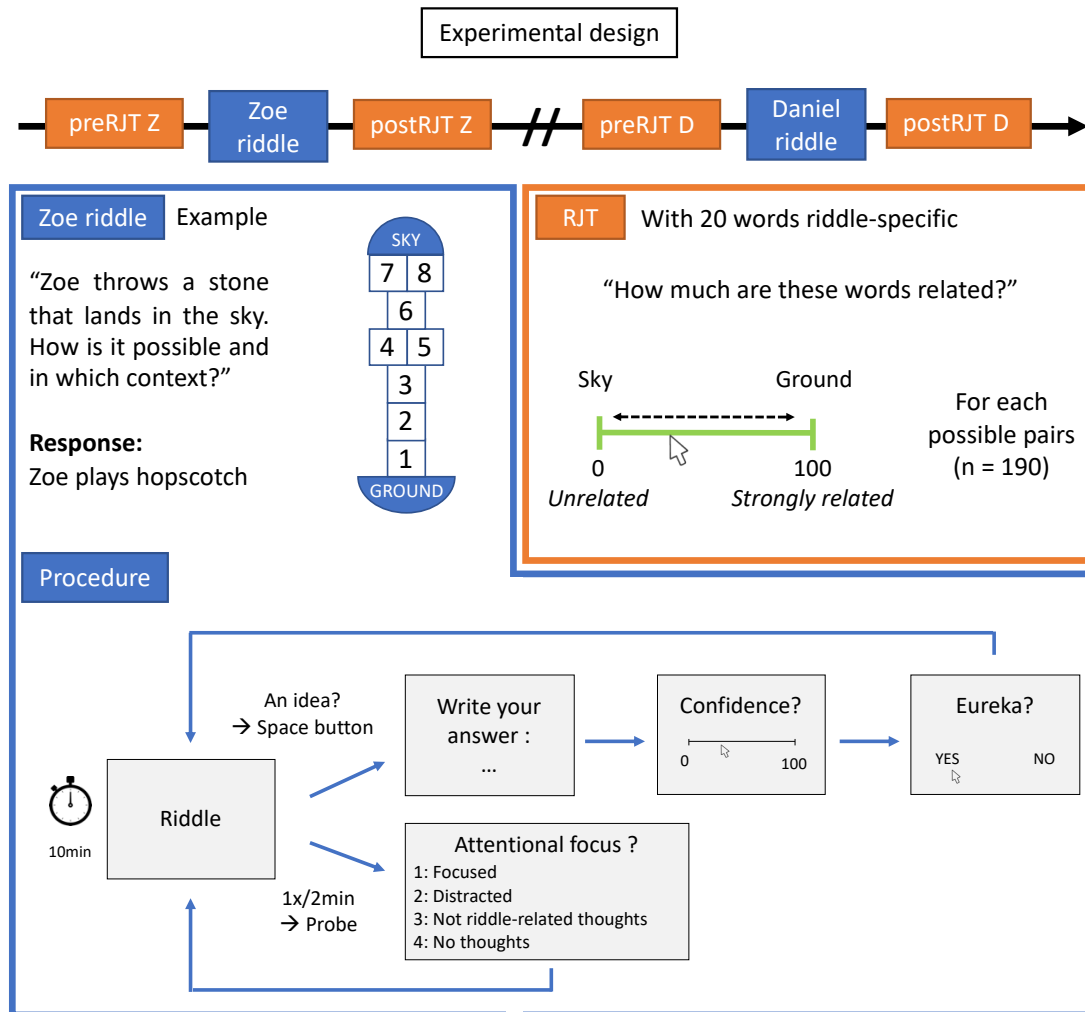


Figure 1. Experimental procedure. Top: Each participant had to solve two different riddles (blue squares, four possible combinations: Zoe/Daniel, Daniel/Zoe, Bar/Car, or Car/Bar) separated by a 15-min break followed by various creativity tasks (not shown in the figure). Each riddle-specific RJT was performed before the problem presentation and after the attempted solving (orange squares). The figure depicts a participant who had to solve Zoe riddle (Z) first, then Daniel riddle (D). The riddle-specific RJTs were used before and after the Zoe riddle (pre-RJT Z and post-RJT Z) and the Daniel riddle (pre-RJT D and post-RJT D). Pre- and post-RJT were similar for a given riddle. An RJT trial is illustrated in the orange frame. **Blue frame:** We used the Zoe riddle as an example; its solution is hopscotch. Hopscotch is a famous backyard children game in which players must throw a stone into squares drawn on the ground and then hop on them. In France, the last square is traditionally represented by a half-circle and named ‘sky’. The experimental procedure is provided in the lower panel. Participants had up to 10 minutes to search for the solution and could propose as many solutions as they wanted during this period. For each answer, they were asked to successively indicate their confidence level about the appropriateness of the proposed solution and whether this solution came to their mind with a subjective experience of Eureka. Every two minutes, we probed them to indicate their attentional focus. **Orange frame:** Participants had to rate the strength of semantic association between two words on a visual scale from 0 (‘unrelated’) to 100 (‘strongly related’). For instance, they had to assess the degree to which the word ‘sky’ is related to the word ‘ground’. Twenty unique words were selected for each riddle and thus differed between RJTs. Word pairs composing riddle-specific RJT trials were all possible combinations of these 20 words (n = 190 pairs). RJT: Relatedness judgement task.

Problem-solving phase

After each riddle presentation, participants had up to 10 minutes to search for the solution (**Figure 1**, blue frame). During this time, the riddle remained displayed at the center of the screen. Participants were instructed to report all ideas that came to mind, even if they judged them bizarre or irrelevant. They could press the space button anytime to propose a response but had to do it only if they knew what to write (to avoid getting additional thinking time). Pressing the space bar stopped the timer. Participants then had up to 30 seconds to write their ideas using the keyboard. The number of ideas that a participant could propose was not limited, and no feedback on the response correctness was provided. For each response they gave, participants were first asked to indicate the confidence they had in their response on a visual scale from 0 (“not sure at all”) to 100 (“completely sure”). Afterward, a new screen displayed “Eureka?”, and the participants indicated whether their response came to their mind with an insight or Eureka phenomenon by pressing a “yes” or “no” button (Laukkonen & Tangen, 2018). Participants were told that a Eureka is “the subjective experience you may have when you solve a problem and the solution comes to mind suddenly, is not the direct result of cognitive efforts, and you are not able to report the mental steps leading to this solution”. It was opposed to analytic solving where “you have a strategy and the feeling of gradually getting closer to the solution”. Participants were also explained that these two solving methods were not exclusive and instructed the participants to consider only the few seconds before the idea came to their mind. Once the participants replied to the Eureka question, the riddle was displayed again, and the timer restarted. Every two minutes, we probed the participants’ attentional focus by asking them what they were thinking about. The participants answered the question by choosing between four options (« Focused on the riddle », « Distracted by the environment », « Thoughts unrelated to the riddle », « No thoughts ») using the keyboard (a predetermined numerical key corresponded to each option).

Relatedness Judgment Task

During the RJT, participants were presented with all possible combinations of word pairs ($n = 190$) based on a riddle-specific 20-word list. On each trial, a different word pair was displayed on the screen, and participants were asked to rate the strength of semantic

association or relatedness between the two words on a visual scale from 0 (“unrelated”) to 100 (“strongly related”), using a slider (**Figure 1**, orange frame). The visual scale was displayed below the word pair on each trial and stayed on the screen until the participant responded. Participants had up to 4.5 seconds to respond using the computer mouse and validate their rating with a left-click. The order of trials was initially pseudo-randomized and then fixed across subjects. We used the Mix software (van Casteren & Davis, 2006) to generate a pseudo-random order where each word appeared equally on the right and left sides of the screen and did not repeat in two consecutive trials. Before starting the task, the participants were instructed to answer as quickly and spontaneously as possible and completed 25 practice trials. Before each first riddle-specific RJT, all the words that composed the pairs were successively displayed on the screen.

Creativity tasks

In addition, we explored how the ability to solve the riddles related to creative abilities measured with several tasks including an adaptation of the Remote Associate Task (Bendetowicz et al., 2017, 2018), the short version of the Torrance Test of Creative Thinking (Torrance, 1972), and the Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA) (Diedrich et al., 2018). All the methodology related to these tasks is detailed in the *supplementary data S11*.

Materials

Riddle construction

To test whether creative problem solving is related to a restructuring of semantic associations, we needed to construct problems that: i) were verbal (i.e., to allow building SemNets from the RJT ratings with words that make sense to the problem); ii) had a unique solution (i.e., to facilitate the classification of participants as solvers or non-solvers); iii) were difficult enough (i.e., to be able to measure a change after a solving phase); and iv) were likely to necessitate creative thinking (i.e., to maximize our chances to observe a restructuring of semantic associations). Problems requiring creative thinking are often ill-defined (i.e., no specific heuristics or usual rules could be used to solve the problem) and putatively prompt a

usual representation that one needs to overcome in order to solve the problem. Riddle like the one found in Durso et al. (Durso et al., 1994), satisfies all of those criteria. We thus selected the Durso riddle and translated it into French (the “Bar” riddle). As we could not find any other similar riddles in the scientific literature, we picked one relevant riddle displayed on different riddle websites and rated as tricky (the “Car” riddle). Finally, we created two novel riddles in such a way that the problem situation/solution was analogous to the “Bar” riddle (the “Daniel” riddle; in both riddles, a person with a threatening behavior is actually helpful) and to the “Car” riddle (the “Zoe” riddle; in both riddles, a person apparently involved in a real-life situation is actually playing a game). English-translated riddles are available in **Tables S1** and **S2**.

Riddle-specific RJT material

We built a verbal material for the RJT task that was specific to each riddle separately and consisted of a list of 20 different words (four different lists for Zoe, Daniel, Car, and Bar riddles; **Table S3**). The same list was used in the RJT performed before (pre-RJT) and after (post-RJT) working on a given riddle. To create those lists, we used a two-step procedure. First, three of the co-authors, experts in creativity research (TB, DO, EV), independently proposed up to 30 words for each riddle (blind procedure). Each of them adopted the approach used by Durso et al. (Durso et al., 1994), consisting in selecting words that were explicitly stated in the problem (e.g., *bar* and *shotgun* in the Bar riddle), related to the solution (e.g., *remedy* and *relieve* in the Bar riddle), or usually associated with the problem but not with the solution (e.g., *drunk* and *loaded* in the Bar riddle). Words could be verbs, nouns, or adjectives. To ensure that selected words could be easily accessible in an individual’s SemNet, we made sure that only frequent words were listed, with a lexical frequency higher than one million occurrences in the lexicon database (<http://www.lexique.org/>; (New et al., 2004)). Second, the three experts shared their respective lists and reached a consensus for 20 words per riddle (including, on average, 4 ± 0.8 words explicitly related to the problem, 6 ± 1 words related to the solution, and 10 ± 1 words loosely associated with the problem but unrelated to the solution). During this selection process, we were careful to avoid words that were too closely related to the solution (e.g., *game* in the Zoe riddle), too strongly associated with other ones (e.g., *bar* and *barman* in the Bar riddle), or too distant from all of the other words within the same list. We retained 20 words (rather than 14 in the Durso et al. study (Durso et al., 1994) to obtain a larger SemNet (larger graphs are ideal for finding subtle differences in global metrics). As a side note, for the

Bar riddle, we used 10 out of the 14 words that were used in the Durso et al. study (Durso et al., 1994) along with ten novel words. We discarded four words (*paper bag*, *pretzel*, *man*, and *barman*) from Durso's original list based on pilot experiments, which showed that they were not related to the problem (*paper bag*) for French people or were isolated from the other words (*pretzel*), or were too strongly related to bar (*man* and *barman*) thus biasing the SemNet metrics.

To ensure that our newly-created RJT lists could capture those associations that are critical for solving the riddles, we asked nine independent and naïve judges to rate how helpful or misleading the link between the words of each of the 190 pairs was in solving a given riddle. The judges scored each riddle separately. They first read the riddle and were given the solution. Then, they rated the importance of each word pair to solve the riddle using a visual scale ranging from -50 ("misleading") to 50 ("helpful"), centered on 0 ("neutral"). Each word pair was successively displayed on the screen above the visual scale in the same way as during the RJT procedure described above. There was no time limit to respond. By averaging the ratings across the judges and then z-scoring across the 190 word pairs, we obtained an 'impact rating', which quantifies the relevance of each word pair ($n = 190$) for solving the riddle. We also computed an indirect impact score determining the importance of each word to solve the riddle. This indirect score was calculated by averaging the impact rating of the pairs involving this word ($n = 19$ pairs per word) for each word. Then, we z-scored the obtained values across the 20 riddle-specific words. This procedure was repeated for each riddle-specific word list. These impact ratings allowed us to weight word pairs (edges) and words (nodes) according to their relevance for solving the problem: the higher the score, the more we considered the pair or the word helpful.

The distribution of impact ratings for both word pairs and words alone are provided in **Figure S1** and **S2**, respectively. Intraclass coefficient (ICC) was higher than .80 for all riddles (Zoe: ICC = .93; Car: ICC = .84; Bar: ICC = .90; and Daniel: ICC = .94), suggesting a good inter-judge reliability. Distributions of impact ratings show that our riddle-specific RJT material captures word associations of varying degrees of relevance for solving the riddle.

Behavioral analyses of the solving phase

For each riddle, participants were assigned to either the solver or non-solver group, depending on their success in solving the corresponding riddle. We computed the solving rate as the percentage of participants who gave the correct solution anytime during the time allowed, i.e., the number of solvers divided by the number of participants who worked on this riddle, excluding participants who knew the riddle beforehand. Of note, six participants were excluded because they were already familiar with the riddle (Bar, $n = 5$; Car, $n = 1$). Among the solvers, we indicated the proportion of participants who reported a Eureka feeling (Kounios & Beeman, 2014; Laukkonen & Tangen, 2018). For each riddle separately, we tested if the riddle's order in the design impacted solving success using a chi-square analysis (corrected with Yates method if needed). Then, we explored the relationships between solving success and Eureka report with a chi-square test. For this test, we used all the riddles and all the participants pooled together, excluding missing values. In addition, we compared the average confidence across participants when a response was correct (if there is one) vs. when responses were incorrect (that is, the average confidence of all incorrect responses at the individual level) for all riddles together using two-tailed paired-samples t -test analyses.

Semantic network analysis

Semantic network estimation

For each participant and each riddle independently, we built two SemNets based on RJT ratings collected before the presentation of the problem (Pre-SemNet) and after attempting to solve the problem (Post-SemNet) (**Figure 1**). These networks were represented as a 20x20 adjacency matrix (one word per row and column) containing all values of the individual RJT ratings. Based on previous studies using this approach (Benedek, Kenett, Umdasch, Anaki, et al., 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Ovando-Tellez et al., 2022), we applied a weighted undirected network method (WUN).

In these estimated WUN, the relation between node a and node b is equal to the relation between node b and node a (i.e., symmetrical adjacency matrix), all edges are kept in the network, and edges are weighted based on the judgements (without any transformation)

provided by each participant during the RJT (Benedek, Kenett, Umdasch, & Anaki, 2017). The benefit of this methodology is that it avoids any arbitrary thresholding of edges for network filtering. This is critical for capturing the possible weaker connections of semantic relationships in aging lexicons (He et al., 2020; Ovando-Tellez et al., 2022).

SemNet metrics computation

For each SemNet (pre-RJT and post-RJT), we computed SemNet metrics (adapted for WUN method) that quantify the connectivity properties of a network using the Brain Connectivity Toolbox (Rubinov & Sporns, 2010) (version 2019-03-03) running with Matlab R2020.

First, we explored the global topology of the networks using global SemNet metrics, that have been commonly used in cognitive research (Baronchelli et al., 2013; Boccaletti et al., 2006; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Oldham & Fornito, 2019; Rubinov & Sporns, 2010; Siew et al., 2019). These metrics include (i) the *efficiency* (Eff_{global} , averaged inverse *shortest path length* in the network), measuring how efficiently the SemNet exchanges information. In SemNet, the Eff_{global} reflects how related two concepts are to each other (Latora & Marchiori, 2001; Strang et al., 2018). (ii) The *clustering coefficient* (CC_{global} , degree to which neighbor nodes are also connected to one another), measuring overall network's connectivity. In the SemNet, higher CC_{global} related to a higher overall relatedness between concepts. (iii) The *modularity* (Q_{global}), measuring the level of segregation of the SemNet (Siew et al., 2019; Sporns, 2011): a higher Q_{global} related to more subcommunities in the network (Newman, 2006). In creativity research for example, more individuals often exhibit a more connected (higher CC_{global}), less segregated (higher Eff_{global} and lower Q_{global}) SemNet than less creative individuals (Benedek, Kenett, Umdasch, & Anaki, 2017; Bernard et al., 2019; Y. N. Kenett et al., 2014; Ovando-Tellez et al., 2022; Yan et al., 2021).

Second, we aim to use SemNets to study focal restructuring effects. Thus, we computed local SemNet metrics to estimate the connectivity and centrality of each node ($n = 20$) and edge ($n = 190$) in the network. Specifically, we computed several metrics that reflect local connectivity properties and estimate how central or efficient a node or an edge is. At the node level, we computed the *eigenvector centrality* (EV_{local} , a self-referential measure of

centrality where nodes have high EV if they connect to other nodes with high EV) and the *clustering coefficient* (CC_{local}). We chose EV as the centrality measure, based on a previous study that showed that EV has higher reliability compared to other centrality measures in cognitive networks (Christensen et al., 2018). At the edge level, we used the *weights* (W_{local} , the individual RJT ratings) and computed the *efficiency* (Eff_{local}). Then, we compared pre- and post-SemNets local metrics to explore changes in the properties of SemNets that could be related to creative problem solving. For this purpose, we calculated an individual difference for each metric between the SemNet built after and before a riddle ($\Delta Metric = Metric_{Post-SemNet} - Metric_{Pre-SemNet}$). The higher the $\Delta Metric$, the larger the increase in the considered metric after working on the riddle.

SemNet cleaning

We excluded from SemNet metrics analyses one RJT of two participants because of technical issue during this specific task (Bar: $n = 1$; Zoe: $n = 1$). In addition, we excluded the participants' RJT in which participants did not respond or rated the word pairs as zero in more than 10% of all trials in one RJT (Zoe: $n = 13$; Bar: $n = 10$; Daniel: $n = 15$; Car: $n = 11$). We considered that these participants were not sufficiently engaged in the RJT and that missing or zero ratings would importantly bias the network with missing links. Non-responses have been substituted by a zero for metrics that cannot be computed if missing values are included. The final sample included 22 correct responses (Zoe: $n = 10$; Daniel: $n = 3$; Bar: $n = 2$; Car: $n = 7$) and 120 incorrect responses (Zoe: $n = 26$; Daniel: $n = 31$; Bar: $n = 32$; Car: $n = 31$) distributed over 80 different participants (see **Table S4** and **S5** for more details).

Statistical analyses of the initial study

To explore whether a restructuring of SemNet can be measured at the global level and related to problem solving, we computed the averaged value of each global metric in the two groups (solvers and non-solvers) at the two different times (Pre-SemNet and Post-SemNet). As the solving rate for each independent riddle was overall low, we pooled the riddles two by two (Zoe/Bar and Car/Daniel) in order to maximize the number of solvers while ensuring that a same participant was not included twice in the same analysis (e.g., a participant who was tested with the Zoe riddle always also performed the Daniel riddle). We ran a factorial ANOVA

with repeated measures, with successful solving as an inter-subject factor and time as an intra-subject factor. We repeated this analysis for each global metric (Eff_{global} , CC_{global} , and Q_{global}) and each riddle couple (Zoe/Bar and Car/Daniel).

Then, we used a nonlinear mixed-effects model to explore how local changes in SemNets could predict problem solving. In these models, successful solving was the dependent variable (isSolved, binary variable), and the fixed-effect predictors were the difference between the two SemNets of a given local metric ($\Delta Metric$, continuous variable), the impact rating (Impact rating, continuous variable), and the interaction factor between the two ($\Delta Metric \times Impact\ rating$, continuous variable). $\Delta Metric$ and Impact rating variables were z-scored. Participants were entered as a random-effect factor in the model. It allows us to take into account the repeated measures across subjects as a random-effect factor (Subject, maximum two riddles per subject) and inter-individual variability. The model can be formalized as follows:

$$isSolved = \beta_1 \Delta Metric + \beta_2 ImpactRating + \beta_3 (\Delta Metric \times Impact\ rating) + (1|Subject) + (-1 + \Delta Metric|Subject) + k$$

We replicated the same model for each local metric (W_{local} , Eff_{local} , CC_{local} , and EV_{local}). All nonlinear mixed models were run on Rstudio (v 1.4.1717) with *glmer* function. For each significant model, we calculated the *balanced accuracy*. It measures the probability that the model correctly classifies the variables according to the condition to be explained (i.e., solver or non-solver), considering its unbalanced distribution.

As our methodology is novel, we did not have data to determine the appropriate sample size in advance. We thus arbitrarily chose to include about 100 participants, which corresponded to a good trade-off between practical constraints and large sample size. The final sample included 99 participants because we had a no show participant at the end. Of note, our behavioral task (the RJT) included a large number of trials ($n = 190$), which reinforces the statistical power of our analyses. To further limit statistical biases, we systematically used mixed models, which take into account inter-subject variability.

Replication study

Since our approach was unprecedented we ran a replication study in an independent sample. This second sample was composed of 151 participants (mean age = 22.06 years, SEM = 1.80 years; 112 women), recruited under the same inclusion criteria and ethical approval as the initial study. Participants followed the same experimental procedure (RJT before the riddle presentation and after a 10-min solving phase), except that they only had to solve one riddle, the same for everyone (we chose Zoe riddle because it had the largest solving rate in our initial study). We arbitrarily chose to include about 150 participants to verify that the effects of the initial study were replicated. This sample size triples the number of individuals compared to the initial sample (49 individuals had to solve Zoe riddle). We used the same material (Zoe riddle and its 20 words list) and the same SemNet estimation procedure detailed above.

We excluded five participants because they declared already knowing the riddle, and one additional participant because of a technical issue during the experiment. For the SemNets statistical analyses, 26 participants (4 solvers and 22 non-solvers) were excluded following the same criteria for SemNet cleaning as in the initial study (>10% zero ratings or missing values in the RJT). We also excluded one participant who found the solution after the post-RJT since we do not know if the solution came to his/her mind in the midst of performing the RJT (potentially influencing the rating half-way through the RJT). The final sample comprised 118 participants, including 27 solvers (23%) and 91 non-solvers (77%).

We used similar statistical analyses to explore the relationship between restructuring at both the global and local SemNet levels. Because of the new data format (i.e., one riddle per individual), we removed from the nonlinear mixed-effects models the participants' random-effect factor on the intercept. This random effect was added in the initial models to capture the repeated measures across subjects, which is no longer relevant here. However, we kept the participants' random-effect factor on the Δ Metric. The model used in the replication sample can be formalized as follows:

$$\text{isSolved} = \beta_1 \times \Delta\text{Metric} + \beta_2 \times \text{ImpactRating} + \beta_3 \times (\Delta\text{Metric} \times \text{Impact rating}) \\ + (-1 + \Delta\text{Metric} | \text{Subject}) + k$$

Results

Initial study

Solving rate, Eureka, and attentional focus on the riddle

The solving rate varied between riddles and was 6.7% for the Bar (n = 3/45 solvers, 2 with Eureka), 8.2% for the Daniel (n = 4/49 solvers, 1 with Eureka), 18.4% for the Car (n = 9/49 solvers, 3 with Eureka), and 28.6% for the Zoe (n = 14/49 solvers, 5 with Eureka) riddles. None of the participants solved each of the two riddles that had been proposed to them. There was no significant difference in solving rate whether a given riddle was performed first or second (Zoe riddle: $\chi^2(1) = 1.84, p = .18$; Car riddle: $\chi^2(1) = 4.59 \cdot 10^{-3}, p = .95$; Bar riddle: $\chi^2(1) = 2.38 \cdot 10^{-30}, p = 1$; and Daniel riddle: $\chi^2(1) = 2.59, p = .11$; all with Yates's continuity correction). For all riddles, 100% of the solvers found the solution during the 10-minute thinking phase (before performing the post-RJT). We explored the relationship between problem solving and the Eureka report using a chi-square dependency test considering all responses together from all participants and riddles. We found that correct responses were more often associated with a Eureka (39.93%) than incorrect response (21.25%; $\chi^2(1) = 4.65, p = .03$). Confidence levels of participants' responses were significantly higher for correct responses (mean = 75.19, SEM = 1.82) than for incorrect ones (mean = 35.38, SEM = 1.53, $t(214) = 8.66, p < .001$). During the solving phase, the proportion of participants who reported being focused remained above 50% for each probe, suggesting that participants were mostly engaged in solving the riddle (**Figure S3**).

Solving rate and creativity

Importantly, we explored how the ability to solve the riddles related to creative abilities measured with several tasks including an adaptation of the Remote Associate Task (Bendetowicz et al., 2017, 2018), the short version of the Torrance Test of Creative Thinking (Torrance, 1972), and the Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA) (Diedrich et al., 2018) (see *supplementary data S11*). We found that creativity scores in all tasks and in the ICAA positively and significantly correlated with the solving rate of the four riddles (see *supplementary data S11* and **Figure S4**). These results indicate that solving the riddles involves creativity-related processes.

Solving success was not associated with a global restructuring of SemNets

We explored whether the global properties of riddle-related SemNets changed as a function of group (solvers or non-solvers) and time (Pre-SemNet and Post-SemNet; **Figure 2**). The SemNets were represented by a 20x20 adjacency matrix in which one row and one column were labeled by one word of the riddle-specific word list. The matrices were symmetrical (undirected network) and contained the raw individual RJT ratings (weighted network). The SemNet metrics were computed using the Brain Connectivity Toolbox (Rubinov & Sporns, 2010). As the solving rate for each independent riddle was overall low, we pooled the riddles into pairs (Zoe/Bar and Car/Daniel) in order to maximize the number of solvers while ensuring that a same participant was not included twice in the same analysis (e.g., a participant tested with the Zoe riddle always did the Daniel one). We performed a factorial repeated measures ANOVA to test the main effect of group (solver/non-solvers), time (Pre-SemNet/Post-SemNet), and interaction (group x time) on each of the global network metrics (Eff_{global} , CC_{global} , and Q_{global}) and each riddle pair (Zoe/Bar and Car/Daniel). None of the effects were significant, except for the main effect of time on Eff_{global} $F(1,143) = 11.56, p < .001, \eta^2 = .01$, for the couple Car/Daniel riddle pair. It revealed that SemNet *efficiency* was higher in the pre-SemNet compared to the post-SemNet. Overall, our results suggest that: i) solvers and non-solvers had a similar organization of the riddle-related semantic associations at baseline (no interaction group x time); ii) problem solving was not reflected by SemNet changes at the global level, and iii) the global structure of SemNets remains largely stable over time (Kenett & Thompson-Schill, 2020).

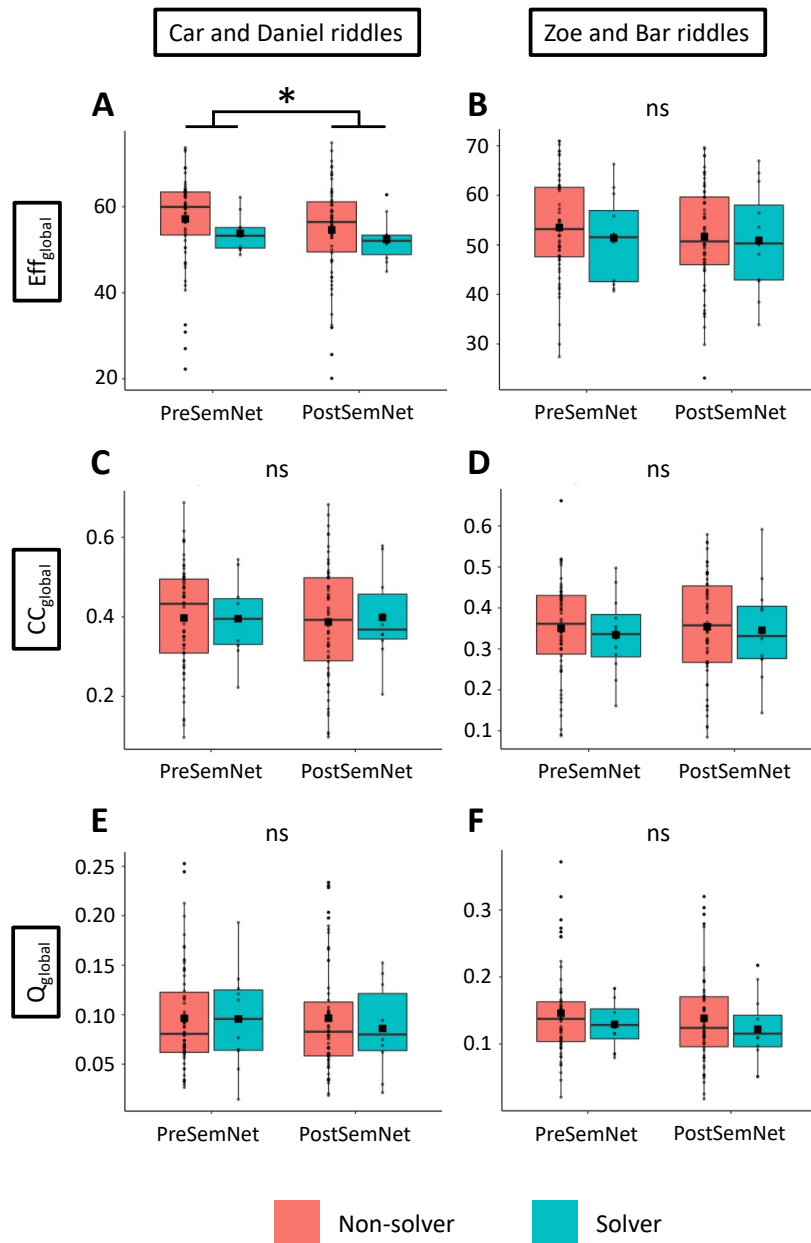


Figure 2. Global SemNet restructuring was not associated with problem solving. Global metrics of SemNets as a function of the group (solvers in blue and non-solvers in red) and time (Pre-SemNet and Post-SemNet) for *efficiency* – Eff_{global} (A and B), *clustering coefficient* – CC_{global} (C and D), and *modularity* – Q_{global} (E and F). Global metrics were computed within the couple of riddles grouping Car and Daniel (A, C, and E) and Zoe and Bar (B, D, and F). Each dot represents a subject, color boxes represent the upper and lower quartiles, and black squares indicate the mean. *: $p < .05$, ns: non-significant differences.

Local changes in SemNet predicted problem-solving abilities

We then explored whether the ability to solve problems could be reflected in local changes in SemNet organization, either at the node or the edge level. We used nonlinear mixed-effects models to predict problem solving based on the difference between individual-

based SemNet metrics over time ($\Delta\text{Metric} = \text{Metric}_{\text{PostSemNet}} - \text{Metric}_{\text{PreSemNet}}$), the impact ratings (measuring the importance of each node or edge to solve the problem, as assessed by an independent sample), and the interaction between the two. Here, we were particularly interested in the interaction effect between the ΔMetric and the impact ratings, which allowed us to assess whether there was a specific restructuring in the edges (word pairs) or nodes (words) that were the most relevant for solving the problem. We ran a separate model for each local metric computed (EV_{local} , CC_{local} , W_{local} and $\text{Eff}_{\text{local}}$).

Whereas the main effect of ΔMetric or impact rating alone was not significant for any of the tested metrics (all p 's > .1), we found a significant interaction effect of ΔMetric and impact rating on problem solving for all SemNet metrics: W_{local} , $\beta = 7.08 \cdot 10^{-2}$, $p = .01$; $\text{Eff}_{\text{local}}$, $\beta = 8.08 \cdot 10^{-2}$, $p = .004$; and EV_{local} , $\beta = 0.28$, $p = .002$ (**Figure 3**), except for CC_{local} , $\beta = 2.63 \cdot 10^{-2}$, $p = 0.88$ (**Table S6**). This interaction effect indicates that larger positive changes in W_{local} , $\text{Eff}_{\text{local}}$, and EV_{local} in pairs/words judged as more helpful to solve the riddles predicted higher solving success. In other words, helpful word-pairs were rated in the post-RJT as more related and connected (W_{local} and $\text{Eff}_{\text{local}}$) after successfully solving the problem than before the problem presentation, and helpful nodes became more central/influential in the networks (EV_{local}). Note that the *balanced accuracies* of the three significant models ranged between .70 and .79, indicating that the interaction term in the model is a powerful parameter to predict problem solving. These findings are consistent with the hypothesis that solving success implies a local restructuring of SemNets targeting the most helpful nodes and edges (Schilling, 2005).

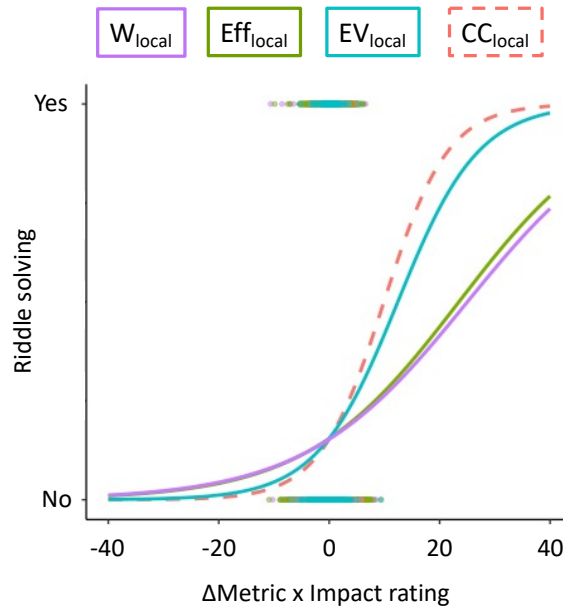


Figure 3. Local SemNet restructuring was associated with problem solving. Lines represent the fitting curves of the interaction effect (Δ Metric x Impact rating) in the four mixed models computed for local SemNet metrics (*weight* – W_{local} in purple, *efficiency* – Eff_{local} in green, *eigenvector centrality* – EV_{local} in blue, and *clustering coefficient* – CC_{local} in red). Each dot represents an individual with the same color code, with the Δ metric weighted by the impact ratings (Δ metric x Impact rating) on the x-axis and solving success on the y-axis. A solid line indicates that a significant effect ($p < .05$) was found.

An illustration of the results is provided for the Zoe riddle (riddle with the highest solving rate). In this riddle, participants had to explain a situation in which “*Zoe throws a stone that lands in the sky*”. The solution is that Zoe is playing hopscotch (a famous backyard children’s game in which the players must throw a stone into squares drawn on the ground and then hop on them). In France, the last square is traditionally represented by a half-circle and named ‘sky’ (Figure 1). Hence, to find the solution, one needs to represent the sky in another way (i.e., a drawing on the floor) than the usual one (i.e., the place where birds and planes fly). SemNets at the individual level are provided with examples of one solver and one non-solver (Figure 4, see Figure S5 to see SemNets at the group level by averaging the Δ metrics within the solver and non-solver group). We can observe that more changes occurred in the solvers’ SemNet than the non-solvers one, suggesting a higher restructuring related to solving. Additionally, positive changes were mainly observed in helpful nodes and edges in the solvers’ network.

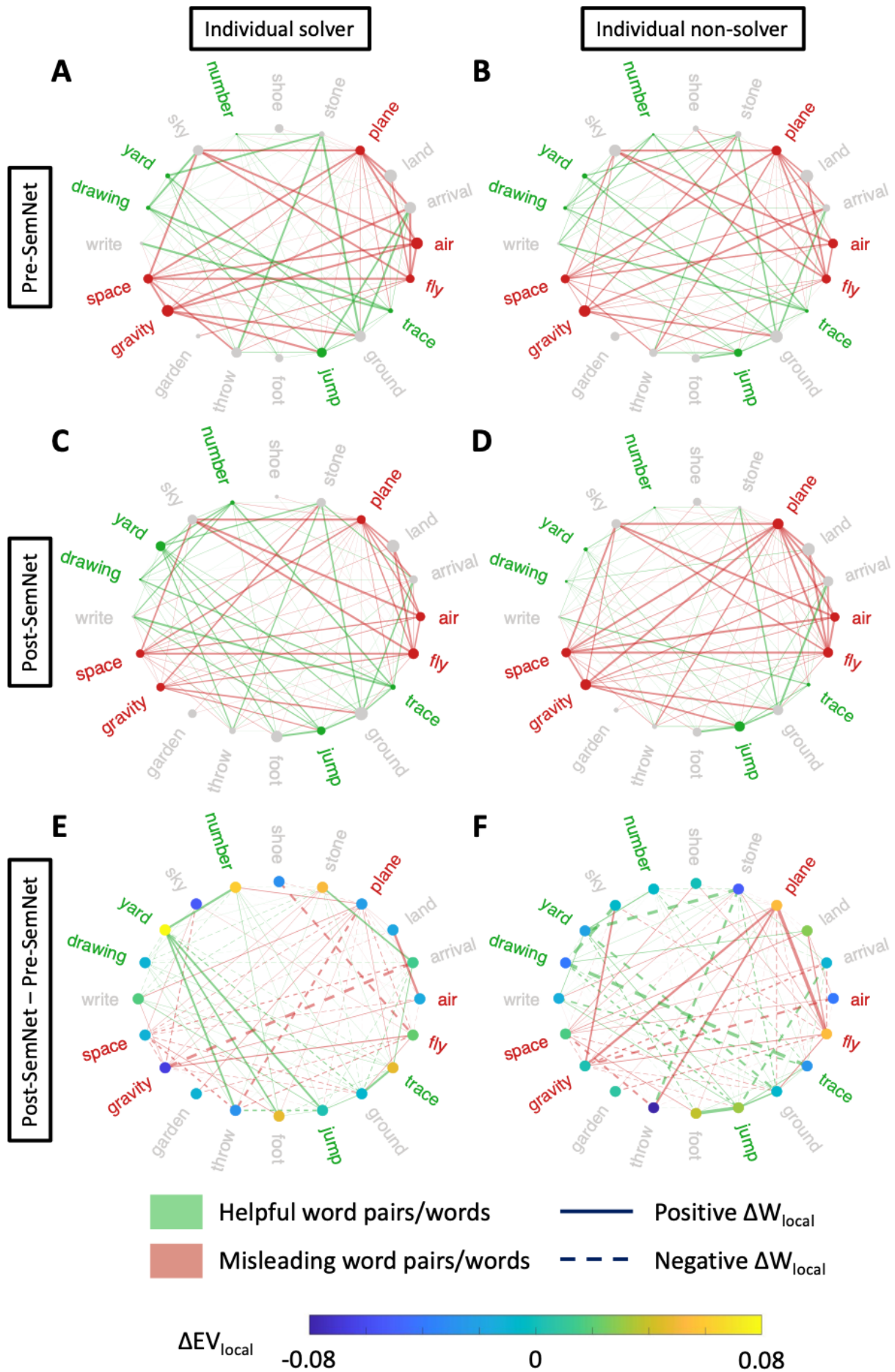


Figure 4. Illustration of the changes in individual SemNets for one solver and one non-solver. Top: SemNets based on the RJT performed before the presentation of Zoe riddle (Pre-SemNet) for one individual who solved the problem (**A**) and one who did not (**B**). **Middle:** SemNets based on the RJT performed after working on the riddle (Post-SemNet) for the same individuals (**C**: solver, **D**: non-solver participant). **Bottom:** Difference between the two SemNets (Post-SemNet – Pre-SemNet) for the same individuals (**E**: solver, **F**: non-solver). For all SemNets, a circle layout is used so that the nodes keep the same position. We categorized the pairs and words as helpful or misleading based on the distribution of the impact ratings (**Figure S1** and **S2**): scores of pairs/words in the first quartile were labeled as misleading ($n = 48$ pairs and $n = 5$ nodes respectively) whereas those in the last quartile were labeled as helpful ($n = 48$ pairs and $n = 5$ nodes respectively). Node colors represent words that have been categorized as helpful (in green) or misleading (in red) to solve the problem. Only helpful and misleading pairs are represented as edges (respectively in green and red). In **A** to **D**, node size is proportional to the EV_{local} value (the bigger the dot, the higher EV_{local}), and edge thickness is proportional to W_{local} (the wider the line, the higher W_{local}). In **E** and **F**, node colors represent ΔEV_{local} from negative value (i.e., $EV_{PreSemNet} > EV_{PostSemNet}$; in blue) to positive value (i.e., $EV_{PostSemNet} > EV_{PreSemNet}$; in yellow), and edge thickness is proportional to the absolute value of ΔW_{local} . Dashed lines represent negative ΔW_{local} (i.e., $W_{PreSemNet} > W_{PostSemNet}$), whereas solid ones represent positive ΔW_{local} (i.e., $W_{PostSemNet} > W_{PreSemNet}$).

Replication study

To assess the reliability of our novel methodology, we ran a replication study in 151 independent participants. Participants underwent the exact same experimental procedure as in our first study, except that they only had to solve a single riddle (Zoe, which had the largest solving rate in our previous sample). Of the 145 remaining naive participants, 32 found the solution (22%, 23 with a Eureka, 7 without a Eureka, and 2 did not answer). As in our previous study, most solvers (31/32) found the solution during the solving phase that directly followed the riddle presentation. One solver found the solution after the second RJT (post-RJT).

We applied factorial repeated measures ANOVAs to explore differences in the global structure of the SemNets with the time (Pre-SemNet and Post-SemNet) and the group (solvers or non-solvers) as factors. This analysis revealed a significant main effect of time on Eff_{global} , $F(1,116) = 44.42$, $p < .001$, $\eta^2 = .01$, and on Q_{global} , $F(1,116) = 4.43$, $p = .04$, $\eta^2 = .002$. SemNets efficiency and modularity were higher in the pre-SemNet compared to the post-SemNet. Similarly to our previous study, the analyses did not reveal a significant main effect of group or group x time interaction.

Finally, we used nonlinear mixed-effects models to explore whether local relevant changes could predict successful problem solving. We replicated the results of the original sample by finding a significant interaction effect of $\Delta Metric$ and impact rating on problem

solving for two of the three significant metrics in the initial study, $\text{Eff}_{\text{local}}$, $\beta = 0.4$, $p = .02$; and EV_{local} , $\beta = 0.12$, $p = .02$, but not for the Weight ($\beta = 0.025$, $p = .14$). All other effects were not significant (**Table S7**).

In summary, we replicated our initial study in three ways. First, we found that solving success was not associated with global restructuring of SemNets. Second, we showed that the organization of the riddle-related semantic associations at baseline was similar between solvers and non-solvers. Finally, we found that local changes in SemNets as measured by the *efficiency* and the *eigenvector centrality* (but not *weight*) predicted successful problem solving.

Discussion

We explored how restructuring of SemNets—reflecting a reorganization of the mental representation of the riddles—serves as a cognitive mechanism underlying problem solving. By building individual SemNets before and after solving a problem, we characterized and quantified the changes in the organization of semantic associations predicting successful problem solving. This method further allowed us to show that the restructuring of SemNets associated with problem solving is not global, but rather restricted to parts of the networks that are the most relevant to the problem solution. Importantly, we replicated these findings in an independent, larger sample.

Previous research has demonstrated how computational network science methodologies allow exploring the structure of semantic memory and how concepts are organized in individual minds via SemNets (Baronchelli et al., 2013; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Kumar, 2021; Siew et al., 2019). Investigating semantic memory structure using SemNet has recently been shown as a tool to empirically explore individual differences in creative abilities and behavior (Benedek et al., 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Kenett et al., 2014; Kenett & Faust, 2019; Ovando-Tellez et al., 2022). Here, we demonstrate that in addition to offering a way to investigate how the organization of semantic associations differs in less and more creative individuals, SemNet methods can further be used to explore

the creative problem-solving process itself. In other words, our approach provides a mechanistic explanation of how a given individual solves new problems.

Our results provide empirical support for an oft-cited theory in the creativity literature, which postulates that the restructuring of semantic associations pertaining to a given problem predicts the successful solving of this problem (Cropley, 2006; Finke et al., 1992; Mumford et al., 1991). Such restructuring idea has often been associated with the notion of insight (Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Seifert et al., 1994; Sprugnoli et al., 2017), i.e., when the solution to a problem comes suddenly and effortlessly (Kounios & Beeman, 2014; Ohlsson, 1984, 1992; Topolinski & Reber, 2010). A seminal theory has proposed that cognitive insight may entail the forging or changing of nodes and/or edges in the semantic (small world) network (Schilling, 2005). Such changes supposedly create a ‘shortcut’ in the network that allows decreasing the distance between different representations and results in a cascade of new connections. Here, we found that solving success was linked with a local increase in efficiency in the edges that are critical for the solution, substantiating Schilling’s hypothesis of a fast decrease in path length within individual’s network representations. However, further work is needed to fully test this theory. The low number of solvers in our studies prevented us from statistically exploring the relationships between insight solving and the restructuring of semantic associations.

To provide a quantitative measure of restructuring, we applied here an original SemNet approach. Our work complements and extends a pioneering study (Durso et al., 1994), which used a pathfinder scaling algorithm to show at the group level that the SemNet of participants who solved the Bar riddle was different from the SemNet of participants who did not solve the riddle, and from the SemNet of those who were given the solution. Our work extends these results by several means. First, we estimated SemNets at the individual level, which allowed us to consider inter-individual variability in semantic associations. Additionally, instead of examining only the structure of SemNet after working on the riddle, we explored individual changes within the SemNet. It allowed us to consider changes of SemNet local properties as a marker of restructuring. Second, we characterized the restructuring predicting problem solving as changes in several specific SemNet metrics related to the edges (*weight* and *efficiency*) and to the nodes (*eigenvalue centrality*). This approach provides valuable

information about how individual SemNets are structured. Importantly, our study allows demonstrating that a problem-related restructuring occurs at a local level, in edges and nodes that were independently assessed as important to the riddle's solution. Interestingly, we did not find any significant differences in the global structure of SemNets between solvers and non-solvers, indicating that networks are stable across participants or that the analyses performed at the group level might be less efficient in capturing subtle differences (see also (Kenett & Thompson-Schill, 2020)). Finally, participants worked on four different riddles instead of one riddle in the Durso et al. study (Durso et al., 1994). The use of nonlinear mixed models provides evidence that the results generalize across the four riddles and are not dependent on the tested riddle. In addition, we provided strong evidence of the relationship between the ability to solve our four riddles and other creative abilities. It suggests that our riddles capture some aspects of creative ability and can be considered as creative problem solving. By adding participants as a random effect in our models, we took into account inter-individual variability in predicting problem solving, which allowed us to focus on the SemNet changes as a mechanism of problem solving rather than as an individual capacity.

Some limitations must be mentioned. First, one might argue that some word pairs during the RJT primed the riddle's solution and gave participants hints. This is unlikely given the low solving rate and since only one participant among the two samples ($n = 250$) found the solution after the post-RJT. Second, the solving rate of the riddles was overall low. It did not allow us to explore the restructuring of semantic associations at the riddle level. Further studies with a larger variety of riddles and including a control riddle that does not require restructuring would be helpful to conclude on the specificity of SemNet restructuring for creative problem solving. Finally, a critical question that our findings leave open relates to the direction and causal link between restructuring and solving. The current study design does not allow us to conclude on this question. However, our new method could be used in further studies to explore the neural correlates of restructuring and address the opened question about its putative causal link with problem solving.

Conclusion

In this work, we directly examined the restructuring effects of semantic memory that support successful problem solving. Restructuring was operationalized as the changes in the organization of semantic associations using SemNets metrics. We related these changes to problem solving success. This new approach allowed us to demonstrate that the restructuring of semantic representations can predict problem solving and be captured by network science tools. Furthermore, we show that problem solving is associated with local changes in edges and nodes that are the most relevant to the problem solution, whereas global network properties remain unchanged. Hence, these results also indicate that an individual SemNet is a dynamic system that can be modulated by context, including a given problem-solving task (Y. Kenett & Thompson-Schill, 2020; Yee & Thompson-Schill, 2016). Overall, our findings provide a new approach to quantify restructuring during problem solving that can be used in further studies to explore factors that might modulate problem-solving abilities, such as sleep (Cai et al., 2009; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018).

References

- Ash, I. K., Cushen, P. J., & Wiley, J. (2009). Obstacles in investigating the role of restructuring in insightful problem solving. *The Journal of Problem Solving*, 2(2).
- Baronchelli, A., Ferrer-i-Cancho, R., Pastor-Satorras, R., Chater, N., & Christiansen, M. H. (2013). Networks in Cognitive Science. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(7), 348-360. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.04.010>
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Aichelburg, C., Levy, R., & Volle, E. (2017). Brain morphometry predicts individual creative potential and the ability to combine remote ideas. *Cortex*, 86, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.10.021>
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Garcin, B., Foulon, C., Levy, R., Bréchemier, M.-L., Rosso, C., Thiebaut de Schotten, M., & Volle, E. (2018). Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain*, 141(1), 217-233. <https://doi.org/10.1093/brain/awx294>
- Benedek, M., Kenett, Y. N., Umdasch, K., Anaki, D., Faust, M., & Neubauer, A. C. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, 23(2), 158-183. <https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1278034>
- Benedek, M., Kenett, Y., Umdasch, K., & Anaki, D. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, 23(2), 158-183. <https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1278034>
- Bernard, M., Kenett, Y. N., Tellez, M. O., Benedek, M., & Volle, E. (2019). *Building individual semantic networks and exploring their relationships with creativity*. 138-144.
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. (2006). Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5), 175-308. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>
- Borge-Holthoefer, J., & Arenas, A. (2010). Semantic networks : Structure and dynamics. *Entropy*, 12(5), 1264-1302.
- Cai, D. J., Mednick, S. A., Harrison, E. M., Kanady, J. C., & Mednick, S. C. (2009). REM, not incubation, improves creativity by priming associative networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10130-10134. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900271106>
- Christensen, A. P., Kenett, Y. N., Aste, T., Silvia, P. J., & Kwapil, T. R. (2018). Network structure of the Wisconsin Schizotypy Scales–Short Forms : Examining psychometric network filtering approaches. *Behavior Research Methods*, 50(6), 2531-2550. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1032-9>
- Chu, Y., & MacGregor, J. N. (2011). Human performance on insight problem solving : A review. *The Journal of Problem Solving*, 3(2), 6.
- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological review*, 82(6), 407.
- Cropley, A. (2006). In praise of convergent thinking. *Creativity research journal*, 18(3), 391-404.
- Danek, A. H., Williams, J., & Wiley, J. (2020). Closing the gap : Connecting sudden representational change to the subjective Aha! experience in insightful problem solving. *Psychological Research*, 84(1), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-0977-8>
- Diedrich, J., Jauk, E., Silvia, P. J., Gredlein, J. M., Neubauer, A. C., & Benedek, M. (2018). Assessment of real-life creativity : The Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA). *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 12(3), 304.
- Durso, F. T., Rea, C. B., & Dayton, T. (1994). Graph-Theoretic Confirmation of Restructuring During Insight. *Psychological Science*, 5(2), 94-98. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1994.tb00637.x>
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative cognition : Theory, research, and applications*.

- He, L., Kenett, Y. N., Zhuang, K., Liu, C., Zeng, R., Yan, T., Huo, T., & Qiu, J. (2021). The relation between semantic memory structure, associative abilities, and verbal and figural creativity. *Thinking & Reasoning*, 27(2), 268-293. <https://doi.org/10.1080/13546783.2020.1819415>
- Hills, T. T., & Kenett, Y. N. (2021). Networks of the Mind : How Can Network Science Elucidate Our Understanding of Cognition? *Topics in Cognitive Science*.
- Kenett, Y. N. (2019). What can quantitative measures of semantic distance tell us about creativity? *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.010>
- Kenett, Y. N., Anaki, D., & Faust, M. (2014). Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00407>
- Kenett, Y. N., & Faust, M. (2019). A Semantic Network Cartography of the Creative Mind. *Trends in Cognitive Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.01.007>
- Kenett, Y. N., Kenett, D. Y., Ben-Jacob, E., & Faust, M. (2011). Global and Local Features of Semantic Networks : Evidence from the Hebrew Mental Lexicon. *PLoS ONE*, 6(8), e23912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023912>
- Kenett, Y., & Thompson-Schill, S. L. (2020). *Novel conceptual combination can dynamically reconfigure semantic memory networks*.
- Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The cognitive neuroscience of insight. *Annual Review of Psychology*, 65, 71-93. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>
- Kumar, A. A. (2021). Semantic memory : A review of methods, models, and current challenges. *Psychonomic Bulletin & Review*, 28(1), 40-80. <https://doi.org/10.3758/s13423-020-01792-x>
- Landmann, N., Kuhn, M., Piosczyk, H., Feige, B., Baglioni, C., Spiegelhalter, K., Frase, L., Riemann, D., Sterr, A., & Nissen, C. (2014). The reorganisation of memory during sleep. *Sleep medicine reviews*, 18(6), 531-541.
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19), 198701.
- Laukkonen, R. E., & Tangen, J. M. (2018). How to detect insight moments in problem solving experiments. *Frontiers in psychology*, 9, 282.
- Lewis, P. A., Knoblich, G., & Poe, G. (2018). How Memory Replay in Sleep Boosts Creative Problem-Solving. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(6), 491-503. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.009>
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69, 220-232.
- Mumford, M. D., Mobley, M. I., Reiter-Palmon, R., Uhlman, C. E., & Doares, L. M. (1991). Process analytic models of creative capacities. *Creativity Research Journal*, 4(2), 91-122. <https://doi.org/10.1080/10400419109534380>
- New, B., Pallier, C., Brysbaert, M., & Ferrand, L. (2004). Lexique 2 : A new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(3), 516-524.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving* (Vol. 104, Numéro 9). Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ.
- Newman, M. E. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 103(23), 8577-8582.
- Ohlsson, S. (1984). Restructuring revisited : II. An information processing theory of restructuring and insight. *Scandinavian journal of psychology*, 25(2), 117-129.
- Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the psychology of thinking*, 1, 1-44.
- Oldham, S., & Fornito, A. (2019). The development of brain network hubs. *Developmental cognitive neuroscience*, 36, 100607.

- Öllinger, M., Jones, G., Faber, A. H., & Knoblich, G. (2013). Cognitive mechanisms of insight : The role of heuristics and representational change in solving the eight-coin problem. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(3), 931-939. <https://doi.org/10.1037/a0029194>
- Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., Bieth, T., & Volle, E. (2022). Brain connectivity–based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eabl4294. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4294>
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2 : Experiments in behavior made easy. *Behavior research methods*, 51(1), 195-203.
- Reitman, W. R., Grove, R. B., & Shoup, R. G. (1964). Argus : An information-processing model of thinking. *Behavioral Science*, 9(3), 270.
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity : Uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059-1069. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003>
- Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2008). Deconstructing Insight : EEG Correlates of Insightful Problem Solving. *PLOS ONE*, 3(1), e1459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001459>
- Schilling, M. A. (2005). A « small-world » network model of cognitive insight. *Creativity Research Journal*, 17(2-3), 131-154.
- Seifert, C. M., Meyer, D. E., Davidson, N., Patalano, A. L., & Yaniv, I. (1994). *Demystification of cognitive insight : Opportunistic assimilation and the prepared-mind hypothesis*.
- Siew, C. S., Wulff, D. U., Beckage, N. M., & Kenett, Y. N. (2019). Cognitive network science : A review of research on cognition through the lens of network representations, processes, and dynamics. *Complexity*, 2019.
- Sporns, O. (2011). The human connectome : A complex network: The human connectome. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 109-125. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05888.x>
- Sprugnoli, G., Rossi, S., Emmendorfer, A., Rossi, A., Liew, S.-L., Tatti, E., di Lorenzo, G., Pascual-Leone, A., & Santarnecchi, E. (2017). Neural correlates of Eureka moment. *Intelligence*, 62, 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.004>
- Steyvers, M., & Tenenbaum, J. B. (2005). The large-scale structure of semantic networks : Statistical analyses and a model of semantic growth. *Cognitive science*, 29(1), 41-78.
- Strang, A., Haynes, O., Cahill, N. D., & Narayan, D. A. (2018). Generalized relationships between characteristic path length, efficiency, clustering coefficients, and density. *Social Network Analysis and Mining*, 8(1), 1-6.
- Topolinski, S., & Reber, R. (2010). Gaining Insight Into the “Aha” Experience. *Current Directions in Psychological Science*, 19(6), 402-405. <https://doi.org/10.1177/0963721410388803>
- Torrance, E. P. (1972). Predictive Validity of the Torrance Tests of Creative Thinking*. *The Journal of Creative Behavior*, 6(4), 236-262. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1972.tb00936.x>
- van Casteren, M., & Davis, M. H. (2006). Mix, a program for pseudorandomization. *Behavior research methods*, 38(4), 584-589.
- Yan, T., Zhuang, K., He, L., Liu, C., Zeng, R., & Qiu, J. (2021). Left temporal pole contributes to creative thinking via an individual semantic network. *Psychophysiology*, 58(8), e13841.
- Yee, E., & Thompson-Schill, S. L. (2016). Putting concepts into context. *Psychonomic bulletin & review*, 23(4), 1015-1027.

Competing interests

The authors declare that they have no competing conflict of interests.

Data availability

The study reported in this article was not formally preregistered. Experimental material is available in the Supplementary data associated with this article. The data sets generated and/or analyzed during the current study, and the scripts written will be available in a persistent repository. Data sharing will be anonymized and will not include participants' demographical information.

Authors' contribution

Conceptualization: YK, DO, EV; Methodology: TB, YK, MOT, ALP, CL, DO, EV; Data acquisition: TB, MS, IM; Investigation: TB; Visualization: TB; Supervision: DO, EV; Writing: TB, YK, DO, EV.

Acknowledgements

This research was partly funded by the 'Agence Nationale de la Recherche' [grant number ANR-19-CE37-001-01], the 'Fondation pour la recherche medicale' [grant number DEQ20150331725], and from the program "Investissements d'avenir" [grant number ANR-10-IAIHU-06]. TB also received funding from the 'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris'. MOT is funded by Becas-Chile of ANID (CONICYT). CL is funded by the Doctoral school ED3C and 'Société Française de Recherche et Médecine du Sommeil' (SFRMS). Part of this work was carried out in the PRISME facility of ICM. We gratefully acknowledge Karim N'diaye for his help in the data collection. We thank all the participants to the study and Clothilde Chappé for piloting part of the material used in this study.

Supplementary data

SI1: Relationship between problem-solving and creative abilities

Creativity tasks

During the 4h-experiment, participants completed several creativity tasks. All tasks were computed using the Psychopy software (Peirce et al., 2019) running on individual computers (except for the ATTA that used paper and pencil material) in a classroom dedicated to cognitive experiments. Task-related instructions were explained before the start of each task.

The Combined Associates Task (CAT; (Bendetowicz et al., 2017, 2018))

The CAT consists in finding a word connecting three given unrelated cue words. Semantic association strength between the expected solution and the three cue words was controlled for each trial. Hence, distant trials (i.e., trials with a distant solution) and close trials (i.e., trials with a close solution) were built. According to the associative theory of creativity, the more remote the elements to be combined (i.e., distant trials), the more creative the process.

Participants underwent 40 trials (20 distant trials and 20 close trials) in random order. They had up to 30 seconds to write their answer with the keyboard. To explore individual creative abilities, we considered the number of correct responses in distant trials (*CAT-dist*) and computed a *CAT-index* (corresponding to the difference between performance on close and distant trials, divided by the mean performance in both conditions). The *CAT-index* reflects the ability to solve distant trials (the more creative condition) when controlling for performance in the less creative condition (close trials): the lower the *CAT-index*, the higher the creativity abilities.

The Abbreviated Torrance Test for Adult (ATTA; (Torrance, 1972))

The ATTA includes three activities (one verbal and two figural). In the first activity, participants had to generate as many ideas as they could related to an open-ended problem (“Suppose that you can walk on air or fly. Imagine what problem you might encounter”). In

the second activity, participants were asked to draw pictures as unusual as possible by using two incomplete figures. In the last activity participants had to see how many pictures or objects they could draw using triangles.

Participants were asked to perform each activity one at a time with a pencil on a dedicated piece of paper. They had 3 minutes per activity. Before starting, instruction was read orally to participants. Participants were evaluated on their productions' fluency, originality, elaboration, flexibility, and other indicators according to the ATTA manual. A composite index (*ATTA-index*) was computed based on all scaled scores: the higher the *ATTA-index*, the higher the creativity abilities.

The Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA; (Diedrich et al., 2018))

The ICAA is a self-questionnaire assessing creative activities and achievements across eight real-life creative domains (e.g., literature, music, art and craft, cooking, sport, visual art, performing arts, science, and engineering). The creative activities (*C-Act*) score reflects the frequency in which participants engaged in various creative activities. Six different questions were asked for each domain, and participants reported the frequency with which they engaged in each activity during the last ten years, using a scale ranging from 0 (never) to 4 (more than ten times). For each participant, the final domain-general score of *C-Act* was the sum of the creative activities across all activities of the eight different domains. The creative achievements (*C-Ach*) score estimated the level of achievement reached in all creative domains. Ten different levels of achievement were included for each domain going from 0 (never engaged in this domain) to 10 (I have already sold some of my work in this domain). For each participant, the final domain-general score of *C-Ach* was the sum of the scores across the eight different domains.

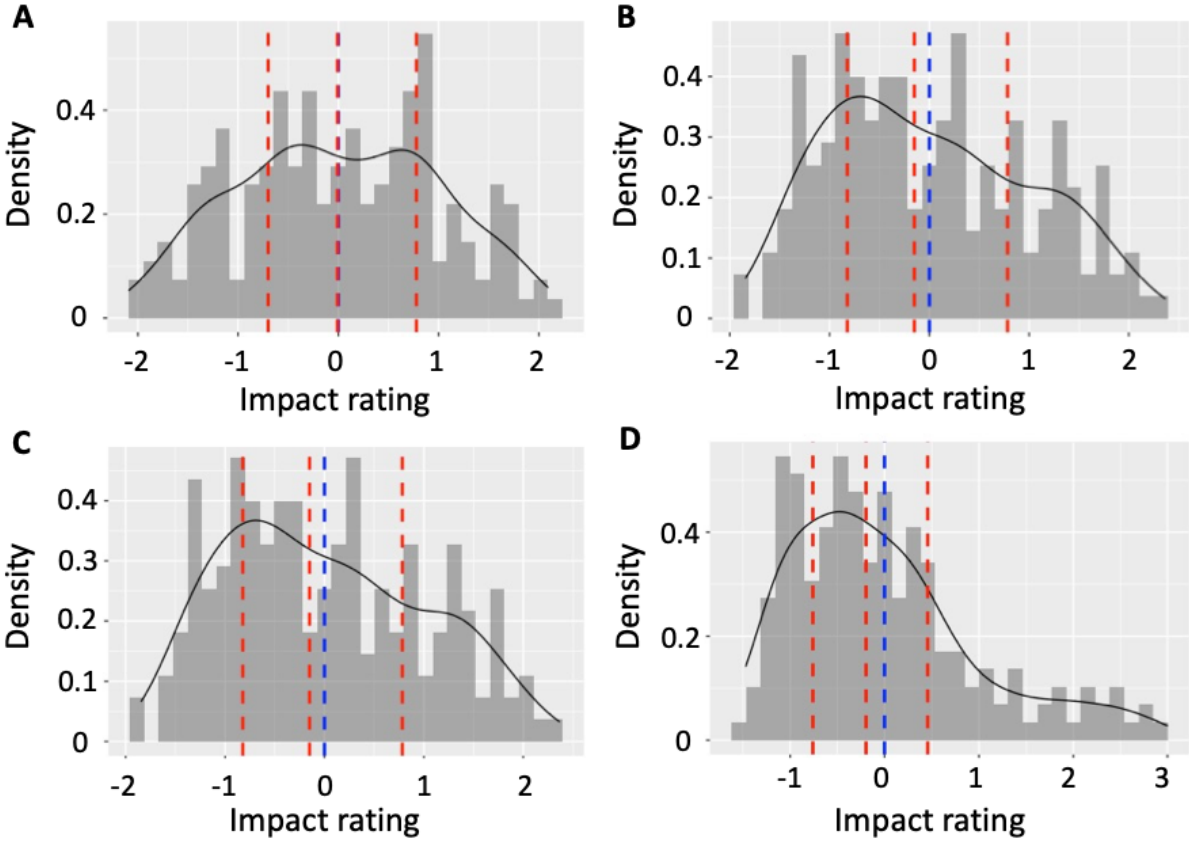
Creative problem-solving assessed by our riddles relates to creative abilities

In order to assess how much our riddles represent creative problems, we explored the relationship between the ability to solve the four riddles (i.e., the individual solving rate across the four riddles) and behavioral variables of creativity tasks. Relations were assessed with

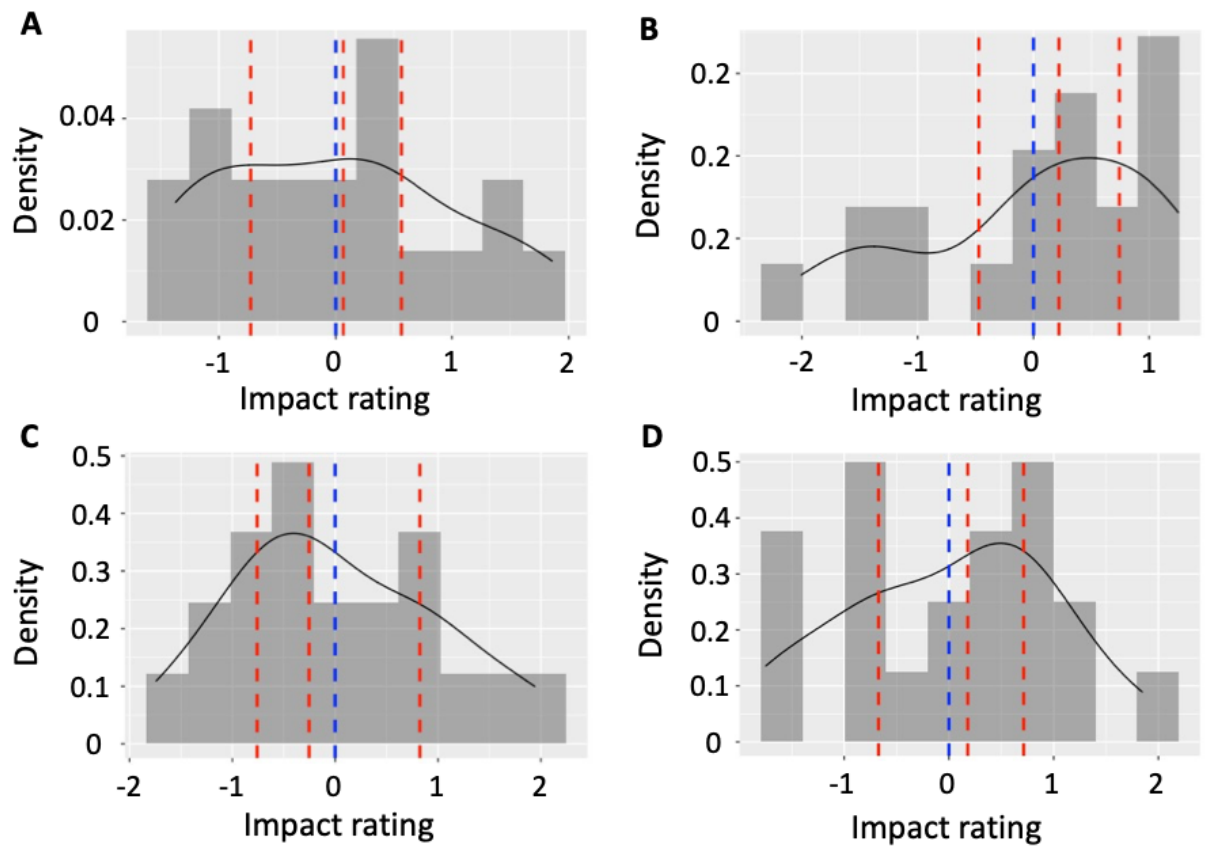
several Spearman correlations, corrected for multiple comparisons with FDR correction. Correlations that survive the FDR correction need to maintain their p_{corr} under .05.

We found that riddle-solving rate was positively and significantly correlated with the *CAT-dist* ($\rho = .33$, $p_{corr} = 2.81 \cdot 10^{-3}$), the *ATTA-index* ($\rho = .29$, $p_{corr} = 4.71 \cdot 10^{-3}$), the *C-Ach* ($\rho = .29$, $p_{corr} = 4.71 \cdot 10^{-3}$), and the *C-Act* ($\rho = 0.27$, $p_{corr} = 7.75 \cdot 10^{-3}$). It was negatively and significantly correlated with the *CAT-index* ($\rho = -.33$, $p_{corr} = 2.81 \cdot 10^{-3}$; **Figure S4**). These results strongly suggest that our riddles' material measures creative thinking and refers to creative problem-solving.

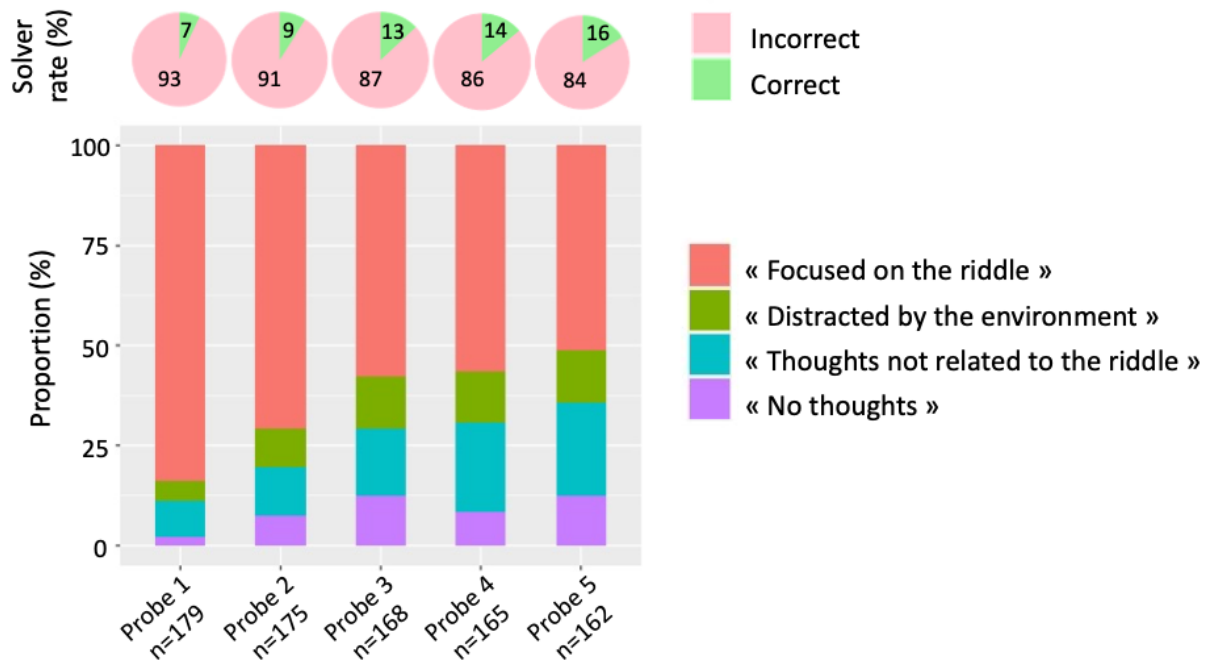
Supplementary figures



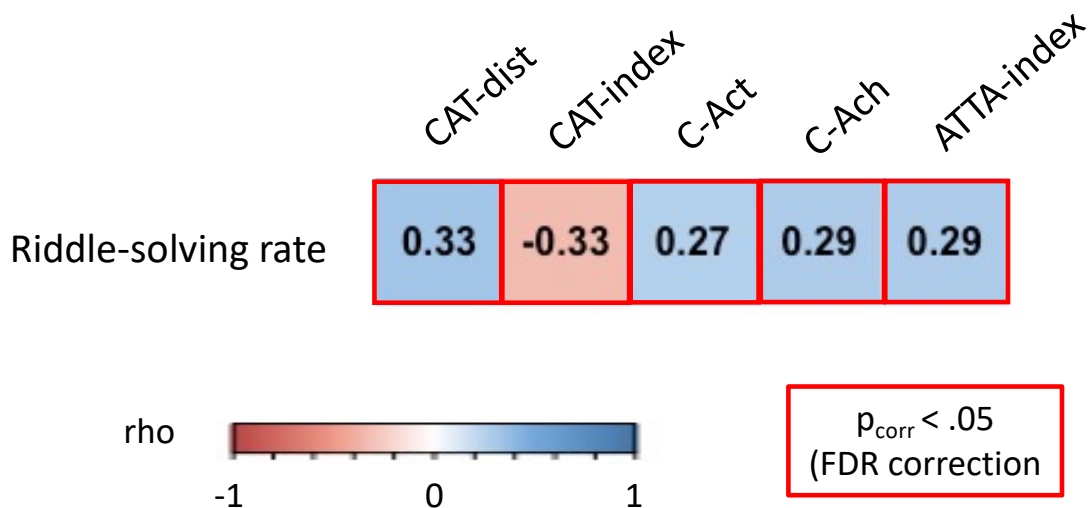
SI Figure S1. Impact ratings of riddles-related word pairs. Distribution of the averaged scores for each word pair (n=190) across the nine judges for Zoe (A), Car (B), Bar (C) and Daniel riddles (D). Scores were normalized (z-scored) within each riddle. Blue dashed line indicates the mean and red ones the median and quartiles.



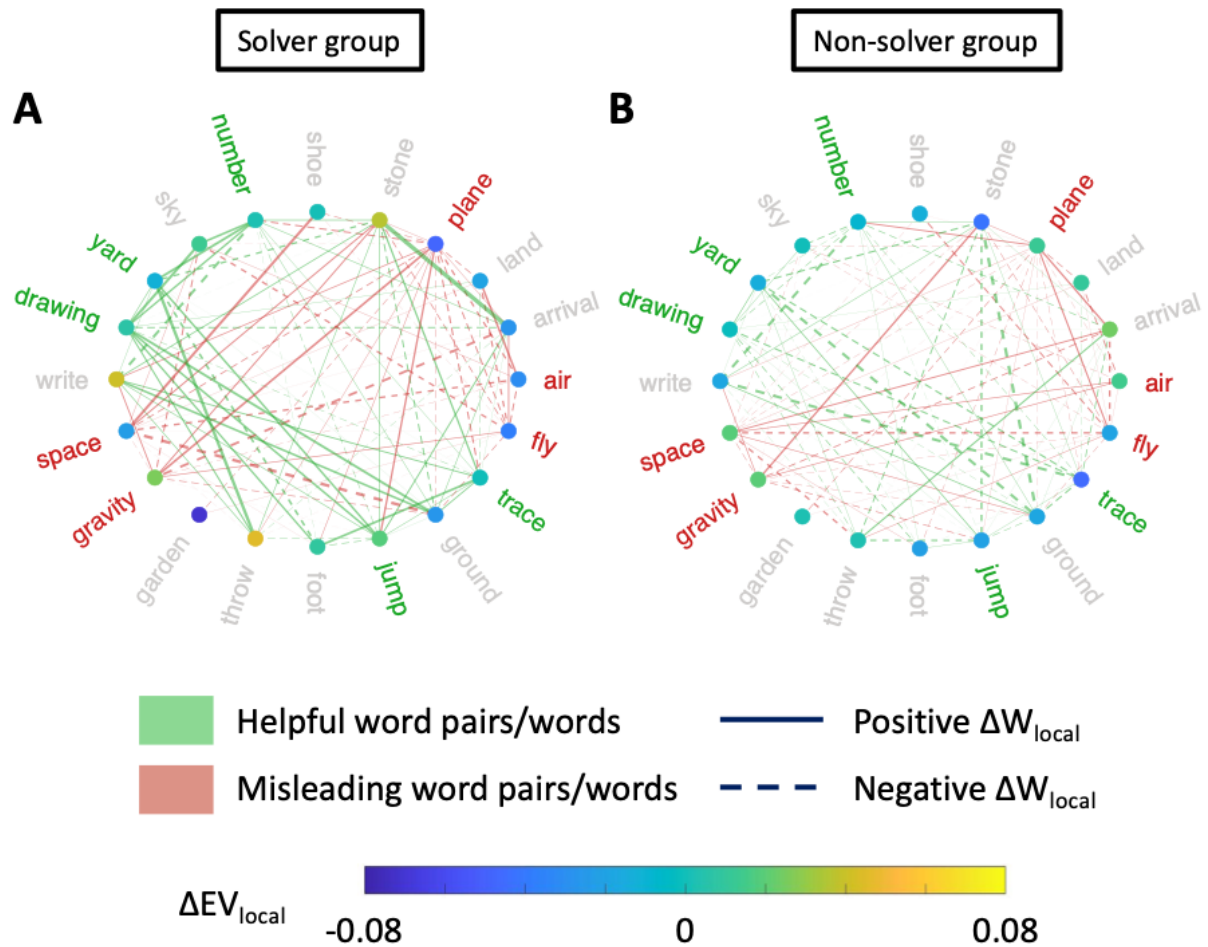
SI Figure S2. Impact ratings for riddles-related words. Distribution of indirect impact ratings calculated for each word ($n = 20$) and riddle (Zoe, **A**; Car, **B**; Bar, **C**; and Daniel, **D**). We averaged the impact rating of the pairs involving this word ($n = 19$ pairs per words) for each word. Scores were normalized (z-scored) within each riddle. Blue dashed line represents the mean and red ones the quartiles.



SI Figure S3. Attentional focus during the thinking phase over time. Proportion of responses to each attentional probe (one every 2 minutes, 5 in total) for each category (“Focused on the riddle” in red, “Distracted by the environment” in green, “Thoughts not related to the riddle” in blue and “No thoughts” in purple) is indicated by the bar plots. This proportion was calculated by adding the total number of non-solvers’ responses for each category across all four riddles, divided by the total number of non-solvers (n) at one given probe. Proportion of solvers (in green) and non-solvers (in red) over time is indicated by the pie charts above the corresponding bar plot (all riddles combined).



SI Figure S4. Correlation matrix between riddle-solving rate and creativity tasks. Correlation coefficients are indicated in the matrix (rho value, Spearman correlation) and with the color bar. Significant correlations after FDR correction ($p_{corr} < .05$) are highlighted with a red square. *CAT-dist* refer to the number of correct distant trials in the CAT and *CAT-index* to the difference in performance between close and distant trials (the lower the *CAT-index*, the higher creativity abilities). *C-Act* and *C-Ach* refer to the involvement in creative activities and achievements in the ICAA, respectively. *ATTA-index* refers to the final combined and scaled score of ATTA.



SI Figure S5. Changes in SemNets at the group level. ΔW_{local} and ΔEV_{local} for Zoe riddle were averaged across individuals in the solver group (A) and the non-solver group (B). SemNets are displayed using a circle layout in which each node has the same position. Colors of the node labels represent their categorization as helpful (in green) or misleading (in red) in solving the problem. We categorized the pairs and words as helpful or misleading based on the distribution of the impact ratings (Figure S1 and S2): scores of pairs/words in the first quartile were labeled as misleading ($n = 48$ pairs and $n = 5$ nodes respectively) whereas those in the last quartile were labeled as helpful ($n = 48$ pairs and $n = 5$ nodes respectively). Node colors represent ΔEV_{local} from negative values (i.e., $EV_{\text{PreSemNet}} > EV_{\text{PostSemNet}}$; in blue) to positive values (i.e., $EV_{\text{PostSemNet}} > EV_{\text{PreSemNet}}$; in yellow). Only helpful and misleading edges are shown (respectively in green and red), and their thickness is proportional to ΔW_{local} (the wider the line, the higher ΔW_{local}). Dashed lines represent negative ΔW_{local} (i.e., $W_{\text{PreSemNet}} > W_{\text{PostSemNet}}$), whereas solid ones represent positive ΔW_{local} (i.e., $W_{\text{PostSemNet}} > W_{\text{PreSemNet}}$). We can observe that more changes occurred in the solvers' SemNet than the non-solvers one, suggesting a higher restructuring related to solving. Positive changes were mainly observed in helpful nodes and edges in the solvers' network.

Supplementary tables

Problem statement

Zoe riddle

French Zoé jette une pierre qui atterrit dans le ciel. Comment est-ce possible et dans quel contexte ?

English Zoe throws a stone that lands in the sky. How is it possible and in which context?

Car riddle

French Un homme pousse sa voiture. Il s'arrête devant un hôtel et se sait alors totalement ruiné. Pourquoi ?

English A man pushes his car in front of a hotel. Instantly he knows he's bankrupt. What's going on?

Bar riddle

French Un homme entre dans un bar et se dirige vers le comptoir pour demander un verre d'eau. Le barman sort un pistolet et le pointe vers l'homme. Ce dernier dit « Merci ! » et s'en va. Comment expliquer la situation ?

English A man walks into a bar and ask for a glass of water. The bartender points a shotgun at the man. The man says "Thank you" and walks out. How to make sense of this story?

Daniel riddle

French Daniel croise dans la rue un couple qui marche vers lui. Alors qu'ils ne se connaissent pas, Daniel tape violement l'homme. Sa femme à ses côtés est paniquée. L'homme est sous le choc, mais Daniel est fier de lui. Pourquoi ?

English Daniel meets a couple walking towards him in the street. Although they don't know each other, Daniel violently hits the man. His wife at his side is panicked. The man is in shock, but Daniel is proud of himself. Why?

SI Table S1. Riddle. Riddles used in our experiment with its related English translation. Solutions are provided in a separate table (**Table S2**).

Problem response

Zoe riddle	
French	Zoé joue à la marelle
English	Zoe plays hopscotch

Car riddle	
French	L'homme joue au Monopoly
English	The man plays Monopoly

Bar riddle	
French	L'homme a le hoquet
English	The man has hiccups

Daniel riddle	
French	L'homme était en train de s'étouffer
English	The man was suffocating

SI Table S2. Riddle answers. Hopscotch is a famous backyard children game in which you have to throw a stone in square drawn on the ground, and then hop on them. In France, the last square is traditionally represented and named as the sky (**Figure 1**).

Zoe riddle		Car riddle		Bar riddle		Daniel riddle	
French	English	French	English	French	English	French	English
air	air	acheter	to buy	bar	bar	agression	attack
arrivée	arrival	arrêter	to stop/arrest	boire	to drink	amour	love
atterrir	to land	banque	bank	bruit	noise	bleu	blue
avion	plane	billet	bill	chargé	loaded	choc	shock
caillou	stone	carte	card	comptoir	counter	cœur	heart
chaussure	shoe	casino	casino	danger	danger	coup	hit
chiffre	number	chance	luck	détente	rest/trigger	couple	couple
ciel	sky	départ	departure	dispute	quarrel	crier	to yell
cour	yard	dormir	sleep	ivre	drunk	dispute	quarrel
dessin	drawing	emprunt	loan	menace	threat	dos	back
écrire	to write	fortune	fortune	merci	thanks	douleur	pain
espace	space	gare	station	mourir	to die	fou	mad
gravité	gravity	hôtel	hotel	peur	fear	gorge	throat
jardin	garden	paix	peace	pistolet	shotgun	jaloux	jealous
lancer	to throw	police	police	remède	remedy	rouge	red
piéd	foot	prison	jail	soulagé	relieved	sang	blood
sauter	to jump	roue	wheel	surprise	surprise	secours	rescue
sol	ground	ruiné	ruined	sympa	friendly	soulager	to relieve
tracer	to trace	vacances	vacation	télé	television	tromper	to cheat
voler	to fly	voiture	car	verre d'eau	glass of water	violent	violent

SI Table S3. Riddle-specific word lists used in the RJT. Lists of 20 words preselected for each riddle with their respective English translations.

Riddle	Number of exclusions because participants already knew the riddle	Proportion of participants who solved the riddle	Number of exclusions because of SemNet cleaning or technical issues	Proportion of participants who solved the riddle after exclusions due to SemNet cleaning	
Zoe	0	14/49	14	10/35	Zoe/Daniel riddles groups n = 49
Daniel	0	4/49	15	3/34	
Bar	5	3/45	11	2/34	Car/Bar riddles groups, n = 50
Car	1	9/49	11	7/38	

SI Table S4. Sample size at the riddle level.

	Number of participants for the behavioral analysis	Number of participants for the SemNet analyses
Total number of responses that were analyzed		
2 riddles solved	0	0
No riddle solved	66	45
1 solved and 1 not solved	28	17
1 solved (the other not analyzed*)	2	5
1 not solved (the other not analyzed*)	2	13
Total number of participants that were analyzed	98**	80

SI Table S5. Sample size at the individual level.

* The other riddle was not analyzed because participants already knew the riddle or because its RJT was excluded after the SemNet cleaning.

** The total number of subjects was not 99 because one participant already knew the two riddles.

	β	SE	z value	p value
Model with Weight				
Δ Metric	8.28e-02	.11	.74	.46
ImpactRating	4.18e-04	2.57e-02	.02	.99
Δ Metric x ImpactRating	7.08e-02	2.84e-02	2.50	.01
Model with Efficiency				
Δ Metric	.11	.11	.94	.35
ImpactRating	4.23e-03	2.54e-02	.17	.87
Δ Metric x ImpactRating	8.08e-02	2.80e-02	2.88	.004
Model with Clustering Coefficient				
Δ Metric	.20	.55	.36	.72
ImpactRating	4.14e-02	.10	.41	.68
Δ Metric x ImpactRating	2.63e-02	.17	.16	.88
Model with Eigenvector Centrality				
Δ Metric	-3.57e-03	8.60e-02	-4.10e-02	0.97
ImpactRating	1.15e-02	7.84e-02	0.15	0.88
Δ Metric x ImpactRating	0.28	9.07e-02	3.07	.002

SI Table S6. Results of nonlinear mixed model analyses (first sample). Δ Metric represents the difference between the considered metric between the PreSemNet and the PostSemNet. ImpactRating corresponds either to the importance of edges or nodes for solving the problem based on independent assessment. Δ Metric x ImpactRating is the interaction between these parameters. We ran a mixed model for each metric. Significant results ($p < .05$) are in bold.

	β	SE	z value	p value
Model with Weight				
Δ Metric	-.01	.05	-.24	.81
ImpactRating	-2.21e-03	.02	-.13	.89
Δ Metric x ImpactRating	2.53e-02	.02	1.47	.14
Model with Efficiency				
Δ Metric	-8.39e-03	.09	-.09	.93
ImpactRating	3.39e-03	.02	.02	.84
Δ Metric x ImpactRating	.04	.02	2.30	.02
Model with Clustering Coefficient				
Δ Metric	.24	.36	.67	.51
ImpactRating	.05	.07	.81	.42
Δ Metric x ImpactRating	.16	.10	1.58	.12
Model with Eigenvector Centrality				
Δ Metric	.04	.05	.85	.40
ImpactRating	-2.80e-03	.05	-.06	.95
Δ Metric x ImpactRating	.12	.05	2.35	.02

SI Table S7. Results of nonlinear mixed model analyses (second sample). Δ Metric represents the difference between the considered metric between the PreSemNet and the PostSemNet. ImpactRating corresponds either to the importance of edges or nodes for solving the problem based on independent assessment. Δ Metric x ImpactRating is the interaction between these parameters. We ran a mixed model for each metric. Significant results ($p < .05$) are in bold.

1.3 Quel est le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes créatifs ? (étude 1B)

Dans l'étude précédente, nous avons établi pour la première fois un lien entre la restructuration et la résolution de problèmes créatifs. Cette étude nous permet également de confirmer la capacité des réseaux sémantiques à capturer et quantifier des changements d'organisation entre deux réseaux sémantiques. Cette méthode ouvre donc la porte à de nouvelles études pour explorer les facteurs pouvant moduler nos associations d'idées et nos capacités à résoudre des problèmes, ou encore étudier d'autres mécanismes de résolution de problèmes impliquant des processus de restructuration. En particulier, dans la présente étude, nous proposons d'explorer le transfert par analogie dans la résolution de problèmes et d'en déterminer le rôle de la restructuration.

Résumé détaillé

Introduction – Le transfert par analogie est une méthode de résolution de problèmes dans laquelle l'utilisation d'un problème déjà résolu auparavant (problème initial) est utilisée face à un nouveau problème (problème analogue). Cette étape suppose d'extraire un schéma d'analogie du problème initial pour produire une règle abstraite applicable dans le problème analogue (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). Plusieurs études ont établi le rôle du transfert analogique dans la résolution de problèmes (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). Cependant ces études étaient majoritairement restreintes à un matériel composé de deux énigmes à énoncé verbal, limitant ainsi la généralisation des résultats à d'autres matériels similaires ou dans des domaines différents (e.g., visuospatial). De plus, la question des mécanismes par lesquels le transfert analogique reste non élucidée. Certains auteurs ont souligné l'importance de la représentation du problème initial dans le transfert par analogie (Cushen & Wiley, 2018; Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Silliman & Kurtz, 2019). L'extraction du schéma d'analogie pourrait résulter d'un changement représentationnel du problème initial permettant de produire une règle générale à l'origine du transfert par analogie (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). Cependant, ces hypothèses restent principalement théoriques et sont encore à démontrer.

Objectif – Cette étude présente deux objectifs principaux (**Figure 24**). Le premier est de confirmer le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes. Pour cela, nous souhaitons répliquer les études antérieures en utilisant quatre nouvelles énigmes et une nouvelle tâche (*Schema Analogy Transfer Task*, SATT) utilisant un matériel non verbal pour capturer des capacités individuelles de transfert par analogie. Le deuxième objectif est d’explorer le rôle de la restructuration du problème initiale dans la résolution d’un problème analogue, en utilisant notre méthode des réseaux sémantique.

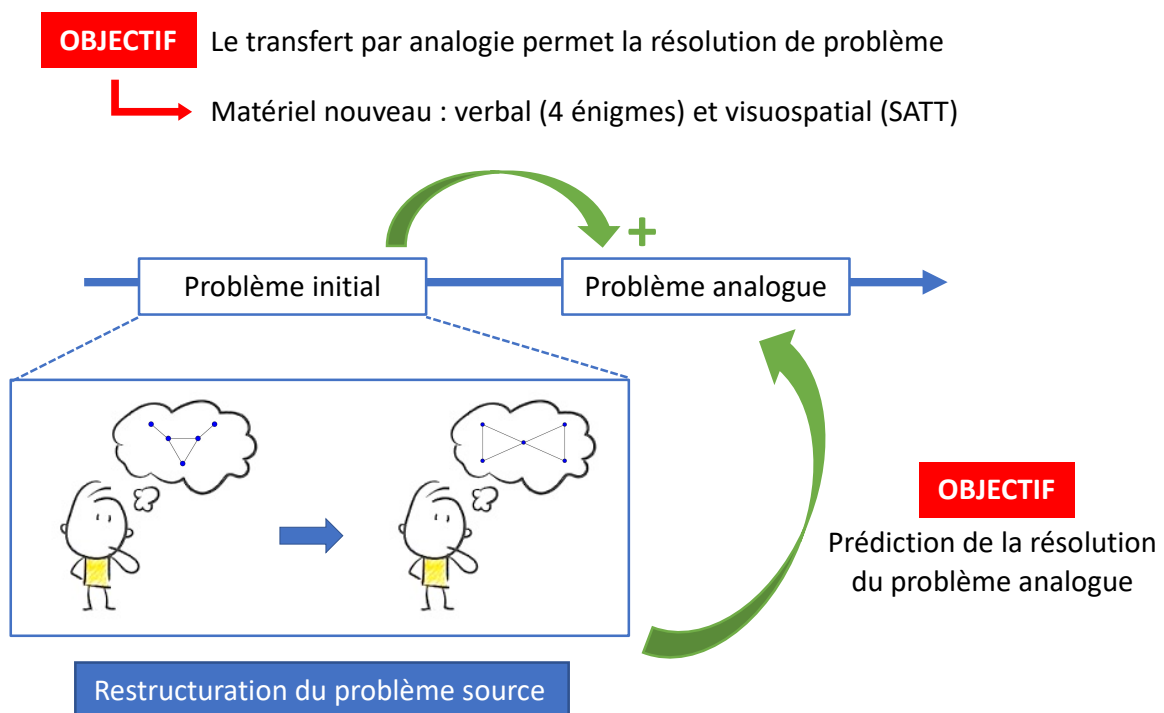


Figure 24. Objectifs de l'étude 1B. Répliquer l'effet du transfert par analogie dans la résolution de problèmes en utilisant un matériel nouveau. Déterminer le rôle mécanistique de la restructuration du problème initial dans la résolution d'un problème analogue.

Méthode – Les participants (n = 99) ont tenté de résoudre successivement deux couples d'énigmes présentant un lien analogique. Dans chaque couple, l'énigme en première position correspondait au problème initial et celle en deuxième position au problème analogue. Les positions des énigmes étaient contre balancées à travers les sujets. Au cours de la résolution du problème analogue, un indice (indiquant explicitement l'existence d'un lien entre le problème initial et analogue) pouvait être donné au participant si celui ne trouvait pas la

solution une fois la moitié du temps imparti écoulé. Une résolution sans indice était considérée comme un transfert spontané, sinon comme un transfert dirigé.

Nous avons quantifié les processus de restructuration relatifs au problème initial en mesurant les changements qui s'opéraient dans les réseaux sémantiques selon la même procédure que l'étude précédente. Brièvement, un réseau sémantique avant et après la tentative de résolution du problème initial étaient construits à partir de RJT (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019). Ces réseaux comprenaient 20 nœuds correspondant aux 20 mots de la liste (spécifique au problème initial considéré), reliés par des liens correspondant aux forces d'associations attribuées pendant la RJT. Les changements d'organisation des réseaux étaient mesurés par la différence entre les métriques caractérisant leurs propriétés de connectivité.

Enfin, les participants ont réalisé la SATT, une adaptation d'une tâche d'analogie (Volle et al., 2010) sollicitant des capacités de raisonnement analogique sur un matériel visuospatial. L'adaptation de cette tâche permet d'entraîner les participants dans un schéma d'analogie appliqué à un domaine (condition *apprentissage*) et d'évaluer si cela permet de faciliter l'application de ce schéma à un nouveau domaine (condition *transfert*) comparativement à une autre condition impliquant un schéma nouveau (condition *contrôle*).

Pour répondre au premier objectif, nous avons comparé les taux de résolution et les temps de réponses moyens des réponses correctes de chaque problème selon qu'il ait été en position initial ou analogue (analyse inter sujet). Nous avons comparé les performances à la SATT (taux de résolution et temps de réponse des réponses correctes) entre la condition *transfert* (où le schéma analogique a été préalablement appris) et la condition *contrôle* (où le schéma analogique est nouveau). Enfin, pour répondre au deuxième objectif, nous avons exploré si les changements d'organisation des réseaux sémantiques en rapport avec le problème initial pouvaient prédire la résolution du problème analogue (en transfert spontané, dirigé ou global).

Résultats – Nous avons trouvé un effet de transfert par analogie sur la résolution de problèmes se caractérisant par (i) des taux de résolution des énigmes plus élevés lorsque l'énigme était en position analogue comparativement à une position initiale, et (ii) des meilleures performances à la SATT en condition *transfert* (où le schéma d'analogie était préalablement appris) comparativement à la condition *contrôle* (où le schéma d'analogie était

nouveau). Enfin, nous avons trouvé que les changements dans les réseaux sémantiques relatifs au problème initial (et en particulier dans des nœuds et liens pertinent pour sa résolution) permettaient de prédire la résolution du problème analogue.

Conclusion – Cette réplique permet de confirmer l’effet du transfert par analogie dans la résolution de problème et de le généraliser à un nouveau matériel verbal et visuospatial. De plus, nous décrivons la restructuration du problème initial comme un mécanisme permettant de résoudre un problème analogue.

Article

Cette étude a été réalisée en **collaboration** avec le Dr **Yoed Kenett**. L’article présentée dans cette thèse est en cours de réflexion et de rédaction. Ainsi, un format préliminaire en français est présenté afin d’exposer les résultats obtenus et pouvoir les inclure dans la discussion de cette thèse. Ces résultats ont fait l’objet de communications orales internationales (*analogical minds seminar*) et lors d’une invitation dans un laboratoire extérieur (*integrative neuroscience and cognition center, BabyLab, université Paris Cité*).

Le transfert par analogie dans la résolution de problèmes créatifs

Introduction

Le raisonnement par analogie permet de faire des liens entre des concepts qui partagent des relations communes (Gentner & Holyoak, 1997; Krawczyk, 2012). C'est une forme de raisonnement de haut niveau propre à l'homme qui permet de produire de nouvelles idées (Green, 2016; Green et al., 2012; Holyoak et al., 1995; Wharton et al., 1996; Yang et al., 2022) d'apprendre de nouveaux concepts (Gentner & Colhoun, 2010) et d'argumenter son discours par des métaphores ou des images mentales (Garner, 2005; Gentner & Goldin-Meadow, 2003). Plus concrètement, il permet de résoudre des problèmes par l'extraction d'un schéma d'analogie qui peut conduire à la formation d'une règle générale applicable dans des situations nouvelles. Appliquer un schéma analogique appris antérieurement à un nouveau problème correspond au transfert par analogie (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998).

Plusieurs études ont établi le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; George & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). Dans ces études, le taux de résolution d'une énigme augmentait significativement si celle-ci était précédée d'une énigme analogue avec sa solution. Cependant, ces études utilisaient majoritairement le même paradigme (transfert du problème de la forteresse sur celui de la tumeur). Ainsi, malgré plusieurs répliques, ce manque de variabilité du matériel utilisé limite la généralisation de ces résultats, notamment à d'autres modalités (e.g., visuospatiale). De plus, l'utilisation de problèmes sous la forme d'énigmes ne permet pas l'extraction d'un score individuel caractérisant les capacités de transfert. En effet, chaque énigme nécessite plusieurs minutes de réflexion en général pour être résolue, ce qui limite le nombre d'essais pouvant être proposé à chaque sujet. De plus, le matériel existant et validé est pauvre. Enfin, les mécanismes par lesquels le transfert analogique opère ne sont pas élucidés.

Plusieurs étapes de résolution d'un problème par transfert analogique ont été décrites (Gentner & Colhoun, 2010). Ces étapes comprennent (i) le rappel d'une situation ou d'un problème initial sur lequel une relation analogique peut s'appliquer, (ii) l'évocation d'un schéma d'analogie permettant d'établir une règle générale, et enfin (iii) l'application de ce schéma au nouveau problème afin de le résoudre. Les mécanismes permettant la réalisation de ces étapes et leur articulation sont encore à préciser.

Certains auteurs ont mis en évidence le rôle des similarités de surface (i.e., les points communs entre les attributs respectifs des éléments constituant l'analogie) dans le transfert par analogie. Bien qu'elles ne soient pas au cœur de l'analogie, leur présence permettrait de faciliter le rappel d'une situation ou d'un problème déjà rencontré qui apparaîtrait pertinent pour réaliser le transfert (Holyoak & Koh, 1987; Luger & Bauer, 1978; Reed et al., 1974). Cependant, ces similarités de surface pourraient aussi induire en erreur si elles ne conduisent pas à rappeler une source qui présente un lien analogique avec la cible (Bassok & Olseth, 1995). Dans ce cas les similarités de surface biaiserait le rappel d'une situation ou d'un problème connu et interfèreraient avec le processus de transfert par analogie (Novick, 1988; Ohlsson, 1992; Zamani & Richard, 2000).

D'autres études mettent en avant l'importance de la représentation du problème initiale dans le transfert par analogie (Cushen & Wiley, 2018; Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Sander & Richard, 2005; Silliman & Kurtz, 2019). Dans cette idée, l'identification d'un schéma d'analogie dans un problème initial pourrait être associée à un changement représentationnel de ce problème, notamment vers une représentation plus abstraite. Cette restructuration en lien avec la création du schéma d'analogie pourrait faciliter la génération d'une règle générale qui permettrait en conséquence le transfert par analogie (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). La restructuration du problème initial pourrait donc être associée à la résolution d'un problème analogue. Cette hypothèse reste à démontrer. L'expérience subjective de Eurêka qui a été décrit lors d'une résolution d'un problème analogue pourrait étayer cette hypothèse. En effet, une expérience de Eurêka est un reflet d'une méthode de résolution avec insight (Bowden et al., 2005; Kounios & Beeman, 2014; Laukkonen & Tangen, 2018; Sprugnoli et al., 2017; Topolinski & Reber, 2010; Weisberg, 2013). Pour certains auteurs, la résolution par insight révèle une

restructuration (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999; MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005), mais pour d'autres ils sont distinguables (Becker et al., 2020, 2021; Cushen & Wiley, 2012). Ainsi le lien entre restructuration et insight et leurs rôles dans le transfert par analogie restent à explorer.

Dans cette étude, nous visons à mieux comprendre le transfert analogique en poursuivant **deux objectifs principaux**.

Le premier vise à répliquer les études antérieures sur le transfert par analogie dans la résolution de problèmes **avec de nouvelles tâches**. Pour cela, nous avons utilisé deux approches. La première approche vise à développer et valider une nouvelle tâche expérimentale utilisant un matériel visuospatial (la *Schema Analogy Transfer Task*, SATT). La seconde approche se base sur le même type de paradigme classiquement utilisé pour étudier le transfert, mais avec un nouveau matériel (quatre nouvelles énigmes). Comme observé dans les études antérieures, nous nous attendons à avoir un taux de résolution plus important pour un problème dans une condition de transfert (i.e., précédée de son analogue) comparativement à une condition naïve (i.e., sans problème analogue préalable).

Le deuxième objectif est d'explorer le rôle de la restructuration comme un mécanisme de transfert par analogie. Notre hypothèse de travail est que la formation d'un schéma d'analogie lors que la tentative de résolution d'un premier type de problèmes permet une restructuration du problème initial, et que cette restructuration facilite la résolution d'un problème analogue. Pour tester cette hypothèse, nous proposons d'utiliser la méthode des réseaux sémantiques développée dans l'étude 1A (Bieth et al., 2021). Cette méthode nous permet de quantifier les phénomènes de restructuration qui s'opèrent lorsque l'on tente de résoudre un problème et ainsi d'explorer si cette mesure de restructuration prédit la résolution d'un problème analogue. Enfin, un **objectif secondaire** est de montrer le lien entre résolution avec insight et transfert par analogie en examinant le rapport subjectif de Eurêka lors la résolution de problèmes analogues.

En résumé, nous allons tester les hypothèses suivantes. **Pour l'objectif 1**, nous testerons si la nouvelle tâche visuospatiale (SATT) permet de montrer que l'apprentissage d'un schéma d'analogie dans un domaine peut faciliter l'application de ce schéma dans un nouveau domaine (**hypothèse 1A**). Deuxièmement, nous testerons si la résolution d'une

énigme est facilitée par la présentation préalable d'une énigme analogue, à l'aide d'un nouveau matériel (**hypothèse 1B**). Ces deux hypothèses répondent au premier objectif de l'étude en répliquant l'effet de transfert par analogie observée dans les études antérieures avec respectivement une nouvelle tâche utilisant un matériel visuospatial et quatre nouvelles énigmes. **Pour l'objectif 2**, nous testerons si la restructuration mentale qui s'opère lors de la résolution d'une première énigme facilite le transfert analogique à une énigme analogue et constitue un mécanisme de transfert par analogie (**hypothèses 2A**). Enfin, nous faisons l'hypothèse que le transfert par analogie peut être associé à une résolution avec insight et le testerons par le recueil subjectif d'un phénomène de Eurêka lors de la résolution de l'énigme (**hypothèses 2B**).

Méthodes

Participants

Les participants correspondaient à ceux de l'étude 1A (Bieth et al., 2021). Il s'agissait de 99 sujets sains de langue maternelle française, âgés entre 18 et 38 ans (26 ans en moyenne, 69 femmes et 30 hommes).

En fonction des analyses, certaines données de participants ont dû être exclues pour différentes raisons selon des critères spécifiques aux tâches expérimentales utilisées. Pour tester les hypothèses 1B, 2A et 2B, les réponses des participants qui étaient déjà familiers avec une énigme sont exclues des analyses ($n = 12$). De plus, pour l'hypothèse 2A, des données de participants ont été exclues des analyses après le prétraitement de la tâche RJT (Relatedness Judgment Task), utilisées pour tester cette hypothèse : deux participants en raison d'un problème technique pendant la tâche et 49 autres en raison d'une proportion de non-réponse ou de réponse égale à 0 supérieure à 10% dans l'une des RJT (Bieth et al., 2021).

Concernant la validation de la SATT (hypothèse 1A), un participant a été exclu en raison d'un problème technique pendant la tâche et un autre parce qu'il n'avait pas compris la tâche. Six autres participants ont été exclus des analyses car ils présentaient des performances qui se détachaient des autres participants dans au moins une des conditions de la tâche (taux de bonne réponse inférieur à -2.5 déviations standards).

Matériel et procédure expérimentale

Au cours d'une expérience de 4h, les participant devaient (i) réaliser la SATT (une tâche non décrite jusque-là dans cette thèse), (ii) résoudre des énigmes (similaires à celles de l'étude 1A) (Bieth et al., 2021), et (iii) faire des tâches de jugement relationnel de mots permettant de construire des réseaux sémantiques (RJT) (**Figure 1**). Toutes les tâches ont été développées sur le logiciel Psychopy (Peirce et al., 2019). Les participants ont réalisé les tâches individuellement sur un ordinateur dans une salle d'exercice dédiée à la réalisation d'expériences cognitives (<https://institutducerveau-icm.org/fr/prisme-human-behavior-exploration-core-facility/>). Les instructions de chaque tâche étaient initialement expliquées et répétées avant de commencer.

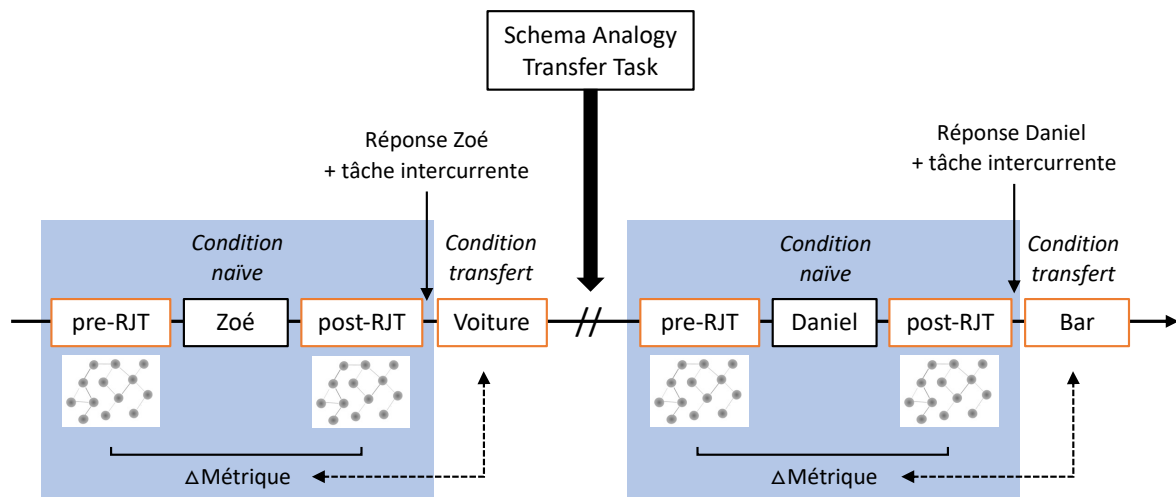


Figure 1. Procédure expérimentale globale. Chaque participant devait résoudre successivement deux couples d'énigmes (e.g., Zoé/Voiture puis Daniel/Bar). Avant et après la première énigme du couple (i.e., la condition *naïve* correspondant aux énigmes de Zoé et Daniel sur la figure), les participants ont réalisé la RJT, permettant de construire deux réseaux sémantiques propre à chacune de ces énigmes. Après avoir donné la réponse à l'énigme initiale, les participants ont réalisé une tâche intercurrente indépendante. Ensuite, la deuxième énigme du couple était proposée aux participants (i.e., condition *transfert* correspondant aux énigmes de la Voiture et du Bar). La différence entre les métriques de chaque paire de réseaux sémantiques relatifs à l'énigme initiale était utilisée comme prédicteur dans la résolution du problème analogue. Entre les deux couples d'énigmes, les participants ont réalisé la *Schema Analogy Transfer Task* (SATT). Les carrés bleus indiquent la partie de l'expérience relative à l'étude 1A (Bieth et al., 2021). Les positions des couples d'énigmes dans l'expérience et des énigmes au sein des couples ont été contrebalancées entre les participants.

Schema Analogy Transfer Task (SATT) (hypothèse 1A)

Principe général

Dans cette tâche, les participants devaient résoudre plusieurs problèmes sous la forme de courts essais qui sollicitent un raisonnement par analogie. Elle est directement adaptée de l'*Analogy task* (Volle et al., 2010) développée et utilisée dans d'autres études pour explorer les capacités de raisonnement par analogie chez des sujets sains (Aichelburg et al., 2016; Volle et al., 2010) et des patients cérébrolésés (Urbanski et al., 2016). L'*Analogy task* utilise des stimuli composés de trois éléments qui respectent un schéma d'analogie appliqué à un domaine (e.g., la symétrie appliquée à la taille où les éléments extérieurs des stimuli sont de même taille ; **Figure 2A**). Dans cette tâche, l'objectif est d'associer à un premier stimuli présenté aux sujets (la source) un autre stimuli (la cible) choisit parmi deux propositions. Ce choix doit se faire sur la base d'une relation commune (i.e., le schéma d'analogie) entre les éléments qui composent respectivement les stimulus source et cible.

L'adaptation de notre nouvelle tâche consistait à entraîner les participant sur des essais utilisant un schéma d'analogie donné appliqué à un domaine particulier et d'évaluer le bénéfice de cet apprentissage sur des essais utilisant le même schéma d'analogie mais dans un domaine différent.

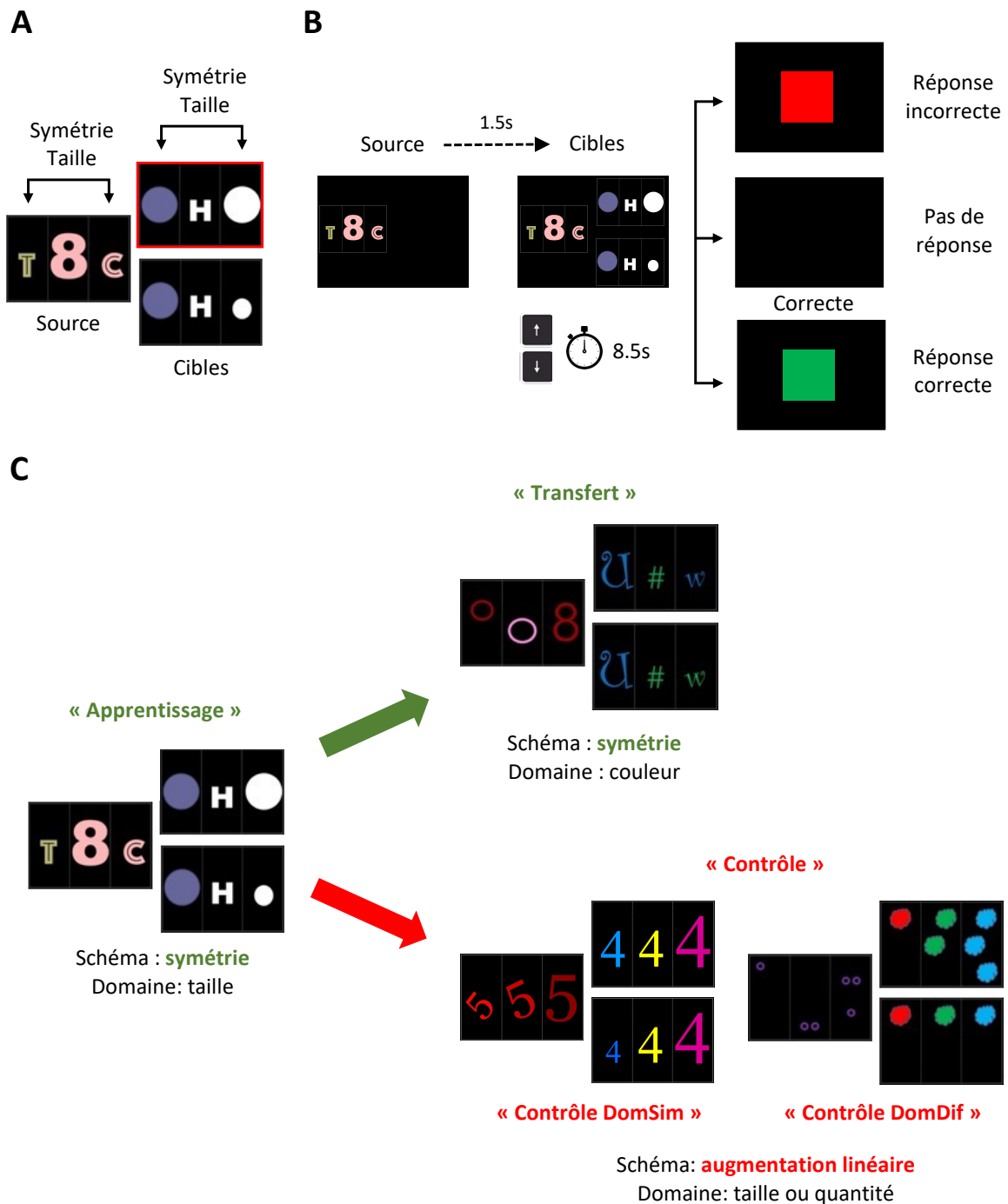


Figure 2. Schema Analogy Transfer Task. **A. Principe général.** La source (à gauche) doit être relié à une des cibles (à droite) selon un schéma d’analogie (la symétrie) appliqué à un domaine (la taille). Ici, la réponse est encadrée en rouge : les éléments de cette cible respectent une relation commune (la symétrie en taille des éléments extérieurs) retrouvée dans la source. **B. Déroulé d’un essai.** La source apparaît seule dans la moitié gauche de l’écran, puis (1.5s ensuite) les cibles apparaissent l’une en dessous de l’autre dans la moitié droite de l’écran. Les participants disposent alors de 8.5s maximum pour proposer une solution. Un carré indique ensuite le caractère correct (carré vert) ou incorrect (carré rouge) de leur réponse. En l’absence de réponse dans le temps imparti, l’écran reste noir pendant une période inter essai de 1 ou 2 secondes (attribuée de manière aléatoire à travers les essais). **C Procédure expérimentale.** La tâche se divise en deux sessions. La première (à gauche) comprend des essais *apprentissage* où un schéma d’analogie est appris dans un domaine donné (ici la

taille). Des essais additionnels de « remplissage » sont ajoutés pour contre balancer le nombre d'essais dans chaque partie (non présenté sur la figure). La deuxième partie (à droite) comprend (i) des essais *transfert* (en haut) où le même schéma que les essais *apprentissage* est appliqué à un nouveau domaine (ici la couleur), et (ii) des essais *contrôle* (en bas) où un nouveau schéma (ici augmentation linéaire) doit être appliqué soit à un nouveau domaine (*contrôle DomDif*, ici le nombre d'items), soit au même domaine que les essais *apprentissage* (*contrôle DomSim*, ici la taille).

Matériel

Le matériel varié de l'*Analogy Task* a permis de générer plusieurs essais différents qui utilisent un même schéma d'analogie et un même domaine. Ce matériel est composé de différents éléments pouvant correspondre à des lettres, des chiffres ou des figures abstraites, pouvant varier dans plusieurs dimensions (couleur, nombre, taille, position, remplissage). Ainsi, nous avons construit 12 essais pour plusieurs combinaisons schéma-domaine, en totalisant sept différentes combinaisons (**Table S1**).

Déroulé d'un essai

Chaque essai suivait la même séquence (**Figure 2B**). D'abord, un premier ensemble d'éléments (la source) apparaissait dans la moitié gauche de l'écran. Une seconde et demie après, deux autres ensembles d'éléments apparaissaient l'un au-dessus de l'autre dans la moitié droite de l'écran (cibles). Les participants devaient choisir laquelle des deux cibles à droite présentait des éléments qui respectaient le même schéma que celui des éléments de la source. Les participants disposaient au maximum de 8.5 secondes pour proposer leur réponse en utilisant la flèche du haut et du bas du clavier pour sélectionner respectivement la cible en haut ou du bas. La position des réponses correctes était équitablement contre balancée (50% de bonne réponse en haut, 50% en bas). Enfin, pour chaque réponse proposée, une indication était donnée aux participants sur la validité de leur réponse. Si un carré vert apparaissait, cela leur indiquait que leur réponse était correcte. En revanche, si le carré était rouge, cela leur indiquait que leur réponse n'était pas correcte. En l'absence de réponse dans le temps imparti, aucun retour n'était donné et l'écran restait noir jusqu'au prochain essai. Les essais étaient séparés d'une période variant aléatoirement à travers les essais (pouvant prendre la valeur 1 ou 2 s). Dans les instructions, les participants étaient informés qu'ils devaient répondre le plus rapidement possible tout en priorisant la validité de leurs réponses. En revanche, aucune information n'était donnée sur les schémas d'analogie, ou les distinctions que nous avons fait entre les conditions (voir section suivante).

Procédure expérimentale

La tâche se divisait en deux sessions séparées d'une période d'incubation de 10 minutes durant laquelle les participants réalisaient une tâche de créativité indépendante (*Alternative Uses Task*) (**Figure 2C**). Chaque session était composée de deux conditions de 12 essais chacune. L'ordre des essais de chaque session était randomisé.

La première session comprenait 12 essais en condition « *apprentissage* » dans lesquels un même schéma (e.g., la symétrie) était appliqué à un domaine spécifique (e.g., la taille). La deuxième session comprenait 12 essais « *transfert* » dans lesquels le même schéma d'analogie que la condition « *apprentissage* » (i.e., la symétrie) était appliqué à un nouveau domaine (e.g., la couleur). Afin de contrôler l'effet de transfert attendu, 12 essais en condition « *contrôle* » étaient ajoutés dans lesquels un schéma d'analogie encore jamais rencontré (e.g., l'augmentation linéaire) était utilisé. Ce schéma d'analogie pouvait s'appliquer soit dans un domaine encore jamais rencontré (e.g., la quantité) soit le domaine utilisé dans la condition « *apprentissage* » (i.e., la taille). Ainsi, la condition « *contrôle* » était sous divisée en 6 essais « *contrôle DomDif* » (où le domaine était nouveau) et 6 essais « *contrôle DomSim* » (où le domaine était celui de la condition « *apprentissage* »). Enfin, afin d'avoir un nombre équivalent d'essais dans chaque session, 12 essais additionnels (de « remplissage ») étaient inclus dans la première session. Ces essais utilisaient un schéma d'analogie (i.e., addition) et un domaine (i.e., partie de lettre) spécifique à cette condition (c'est-à-dire jamais rencontré autrement).

Pour contrôler que le matériel de la tâche n'influençait pas l'effet de transfert, quatre blocs ont été construits afin de contre balancer le domaine entre les conditions « *apprentissage* » et « *transfert* » et le schéma d'analogie entre les conditions « *apprentissage* » et « *contrôle* » (**Table S1**). Seuls les essais de « remplissage » dans la première session étaient identiques pour tous les sujets. Chaque sujet a réalisé l'un des blocs et le nombre de participant était équilibré entre les différents blocs (n = 25, sauf pour le bloc 3 où n = 24).

Avant de commencer la tâche, 12 essais d'entraînement étaient proposés aux participants pour les familiariser avec l'exercice. Ces essais comprenaient des schémas d'analogie et des domaines non utilisés par la suite dans la vraie tâche.

Variable mesurée

Pour chaque essai, plusieurs variables étaient mesurées : la validité de la réponse (correcte ou incorrecte), le temps de réponse (TR) correspondant à la durée entre l'apparition des cibles et la réponse du participant (déterminée par la pression de la touche du clavier pour répondre) et l'ordre dans lequel il était réalisé par le participant après sa randomisation (numéro indiquant le rang).

Exclusions de participants

Un participant a été exclu en raison d'un problème technique pendant la tâche et un autre parce qu'il n'avait pas compris la tâche. Six autres participants ont été exclus des analyses car ils présentaient des performances qui se détachaient des autres participants dans au moins une des conditions de la tâche (taux de bonne réponse inférieur à -2.5 déviations standards). Ainsi, l'échantillon final analysé pour tester hypothèse 1A était composé de 91 sujets (25 dans le bloc 1, 22 dans le bloc 2, 22 dans le bloc 3 et 20 dans le bloc 4).

Résolution de problèmes (Hypothèse 1B et 2B)

Procédure expérimentale

Les problèmes étaient opérationnalisés expérimentalement par des énigmes comme décrit dans l'étude 1A (l'énigme de Zoé, de Daniel, de la Voiture et du Bar ; voir méthode article 1A) (Bieth et al., 2021). Ce qui n'était pas détaillé dans l'étude 1A était que chaque participant devait résoudre successivement deux couples d'énigme analogue (soit Zoé/Daniel, soit Voiture/Bar). Dans chaque couple, les énoncés et les solutions des énigmes présentaient un schéma général commun analogique. Au sein d'un couple, l'ordre de passation des énigmes déterminait leur condition (**Figure 1**). L'énigme en première position était en condition « naïve » (i.e., pas d'énigme analogue avant) alors que l'énigme en deuxième position était en condition « transfert » (i.e., précédée d'une énigme analogue). La position des énigmes au

sein d'un couple était contre balancée entre les participants afin d'avoir un taux de résolution de base (i.e., en condition « *naïve* ») pour chaque énigme et de tester l'effet de transfert dans les deux sens (e.g., Zoé sur Voiture et Voiture sur Zoé). De plus, l'ordre des couples d'énigmes au cours de l'expérience était également contre balancé entre les sujets afin de contrôler un potentiel effet d'entraînement (positif) ou de fatigue (négatif) sur les performances de résolution de problèmes. Dans l'étude 1A, seule l'énigme « *naïve* » de chaque couple était considérée. Ici nous nous sommes intéressés à l'énigme « *transfert* » (**Figure 1**).

Déroulé d'une phase de résolution

Pour chaque énigme, les participants disposaient de 10 minutes dans la condition « *naïve* » et 8 minutes dans la condition « *transfert* » pour essayer de trouver la solution. Pendant les périodes de réflexion, les participants étaient encouragés à donner autant de réponses qu'ils le souhaitaient sans s'autocensurer. Pour chaque réponse donnée, ils devaient d'abord renseigner leur niveau de confiance par rapport à leur réponse, en utilisant une échelle visuelle allant de 0 (« pas du tout confiant ») à 100 (« très confiant »). Puis, ils devaient rapporter si oui ou non la réponse leur était venue avec une expérience subjective de Eurêka, expliquée préalablement comme « une expérience subjective survenant lorsque la solution à un problème survient soudainement, sans effort et sans pouvoir expliquer le cheminement qui a conduit à cette solution ».

Dans la condition « *transfert* », la période de réflexion était divisée en deux parties de durées équivalentes. Pendant la première moitié du temps imparti, les participants ne disposaient d'aucune information autre que l'énoncé de l'énigme (condition « *transfert spontané* »). A la fin de cette première partie, les participants étaient invités à donner la réponse qui leur semblaient la plus probable. Quand le sujet n'avait pas trouvé la solution, un indice était présenté au participant indiquant explicitement qu'un lien était à faire avec l'énigme précédente et sa solution. Le participant bénéficiait alors de 4 minutes additionnelles de réflexion pour essayer de trouver à nouveau la solution (condition « *transfert dirigé* »). Quand le participant trouvait d'emblée la solution (i.e., « *transfert spontané* »), il poursuivait la suite de l'expérience.

Variables mesurées

Pour chaque énigme et chaque condition, nous avons calculé le taux de résolution correspondant au nombre de participants ayant trouvé la solution à l'énigme divisé par le nombre de sujet ayant essayé de la résoudre. Ainsi, un taux de résolution était obtenu pour chaque énigme (Zoé, Daniel, Voiture et Bar) dans chaque condition : *naïve* (i.e., sans énigme analogue avant), *transfert spontané* (i.e., avec énigme analogue avant mais sans indice), *transfert dirigé* (i.e., avec énigme analogue avant mais avec indice en excluant les participants ayant trouvé la solution en transfert spontané) et *transfert global* (i.e., avec énigme analogue avant, avec et sans indice confondus). Chaque réponse était caractérisée par le rapport ou non d'un Eurêka et un temps de réponse (TR) correspondant à la période entre l'apparition de l'énigme et la pression de la touche espace. Nous avons précisé le nombre de Eurêka parmi les réponses correctes, ainsi que le temps de réponse moyen à travers les réponses correctes.

Exclusion de participants

Les réponses des participants (n = 12) qui étaient déjà familiers avec une énigme ont été exclues des analyses (Bar : n = 10 dont 5 en condition *naïve* et 5 en condition *transfert* ; Voiture : n = 2 dont 1 en condition *naïve* et 1 en condition *transfert*).

Tâche de jugement d'association de mots (Relatedness Judgement Task, RJT) (hypothèse 2A)

Avant et après la présentation de l'énigme en condition « *naïve* », les participants réalisaient la RJT permettant de construire des réseaux sémantiques, de façon identique à l'étude 1A (**Figure 1**). En particulier, la procédure et le matériel (liste de mots spécifiques à chaque énigme) étaient les mêmes (voir méthode article 1A) (Bieth et al., 2021).

Après le traitement de la RJT, des données de participants ont été exclues des analyses. Deux participants ont été exclus en raison d'un problème technique pendant la tâche (Bar : n = 1 ; Zoé : n = 1), et 49 autres en raison d'une proportion de non-réponse ou de réponse égale à 0 supérieure à 10% dans l'une des RJT (Zoé : n = 13 ; Bar : n = 10 ; Daniel : n = 15 ; Voiture : n = 11) (voir méthode étude 1A) (Bieth et al., 2021).

Estimation des réseaux

La construction des réseaux sémantiques et le calcul de leur métrique ont été réalisés selon les mêmes méthodes que l'étude 1A (Bieth et al., 2021). Cette méthodologie est brièvement rappelée ici.

Construction des réseaux

Pour chaque individu et chaque énigme en position *naïve* (i.e., première à être proposée dans le couple), nous avons construit deux réseaux sémantiques en utilisant les RJT : un réseau avant la présentation du problème et un autre après la tentative de résolution du problème. Ces réseaux sémantiques correspondaient à des matrices de 20x20 (un mot par ligne et colonne) dont les cellules contenaient les valeurs de jugement issues de la RJT de chaque sujet. Les réseaux étaient construits de manière pondérée et non dirigée, utilisant les jugements de relations entre les mots pour pondérer les liens entre les nœuds du réseau (Benedek et al., 2017; Bernard et al., 2019; Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022).

Calcul des métriques des réseaux sémantiques

Pour chaque réseau sémantique, nous avons calculé plusieurs métriques permettant de quantifier leur organisation. Pour cela, nous avons utilisé la *Brain Connectivity Toolbox* (Rubinov & Sporns, 2010) (version 2019-03-03) via Matlab R2020, permettant de calculer plusieurs métriques caractérisant chacun des liens ($n = 190$) et nœuds ($n = 20$) au sein des réseaux. Ces métriques comprenaient :

- La *weight* (W) correspondant à la valeur brute de la force d'association jugée lors des RJT : plus W d'un lien augmentait, plus les mots constituant le lien étaient fortement associés.
- L'*efficiency* (Eff) représentant mathématiquement l'inverse du chemin le plus court pour connecter deux nœuds : plus Eff augmentait, plus le lien était efficace pour échanger de l'information dans le réseau.
- L'*eigenvector centrality* (EV) correspondant à une mesure de centralité d'un nœud : plus EV augmentait, plus le nœud était central et influent dans le réseau.

- Le *clustering coefficient* (CC) mesurant la probabilité que deux nœuds connectés à un nœud soient eux-mêmes connectés : plus CC augmentait, plus le nœud était interconnecté avec ses voisins.

Pour explorer un changement d'organisation dans les réseaux sémantiques, nous avons comparé les métriques calculées dans les deux réseaux en calculant une différence entre les métriques du réseaux sémantiques construits avant et après l'énigme (Δ Métrique = Métrique_{Post} – Métrique_{Pré}). Cette différence était donc réalisée pour chaque nœuds ou lien (selon la métrique considérée) à l'échelle de chaque individu. Plus la valeur de Δ Métrique augmentait, plus l'augmentation de la métrique considérée augmentait dans le réseau sémantique après avoir travaillé sur l'énigme (comparativement au réseau sémantique avant sa présentation).

Analyses statistiques

Chaque analyse statistique vise à tester chaque hypothèse annoncée en introduction.

Hypothèse 1A : Réplication du transfert par analogie en visuospatial par validation de SATT

L'hypothèse 1A vise à démontrer que l'apprentissage d'un schéma d'analogie dans un domaine facilite l'application de ce schéma dans un domaine nouveau, validant ainsi notre nouvelle tâche. Pour cela, nous avons exploré les différences de performances (taux de réponse correcte, TR) en fonction des différentes conditions de la tâche (*apprentissage*, *transfert* et *contrôle*). En cas de transfert, de meilleures performances moyennes et/ou leur amélioration plus rapide dans la condition *transfert* étaient attendues par rapport aux conditions *apprentissage* et *contrôle* (plus de réponses correctes, TR plus rapides, pente d'amélioration plus pentues).

Pour tester cet effet, nous avons réalisé des analyses de variance (ANOVA) mixtes intégrant le sujet comme facteur aléatoire. Dans ces modèles, nous avons testé à la fois l'effet de la condition sur les performances moyennes au cours de la tâche (facteur condition, variable catégorielle à trois niveaux : *apprentissage*, *transfert* et *contrôle*) et l'amélioration de performances au fur et à mesure des essais (facteur d'interaction condition x rang) sur la

variable dépendante « performance » qui pouvait correspondre soit à la validité de la réponse (correct, variable binaire) ou le TR (variable continue). Le facteur rang dans le modèle représentait l'ordre dans lequel chaque participant avait réalisé les essais après randomisation (variable discrète ordinale). Ces modèles peuvent être formalisés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Correct} &= \beta_1 \times \text{rang} + \beta_2 \times \text{condition} + \beta_3 \times (\text{rang} \times \text{condition}) + (1|\text{Sujet}) + k \\ \text{RT} &= \beta_1 \times \text{rang} + \beta_2 \times \text{condition} + \beta_3 \times (\text{rang} \times \text{condition}) + (1|\text{Sujet}) + k \end{aligned}$$

Toutes les analyses sont réalisées avec Rstudio (v 1.4.1717) en utilisant la fonction *aov*. Lorsque cela était nécessaire, des analyses post hocs ont été conduites afin de déterminer le sens de l'effet observé. Ces analyses correspondaient au même modèle décrit précédemment mais en réduisant la dimension du facteur condition à deux niveaux afin de comparer les conditions deux à deux. Les valeurs de *p* rapportées dans les résultats pour les tests post hocs étaient corrigées pour le nombre de comparaisons réalisées par la méthode *False Discovery Rate* (FDR).

Des analyses complémentaires ont été réalisées afin de vérifier si l'effet transfert dépendait du schéma à transférer ou du domaine, c'est à dire du bloc. Nous avons vérifié si l'effet de transfert (principalement capturé par la comparaison des performances moyennes entre les conditions *transfert* et *contrôle*) était retrouvé en réalisant les modèles précédents à l'échelle de chaque bloc. Dans ces modèles, le facteur condition devenait une variable catégorielle à deux niveaux (*transfert* et *contrôle*). Le facteur sujet était toujours considéré dans le modèle comme un facteur aléatoire. Les valeurs de *p* étaient corrigées par le nombre de comparaison (correspondant au nombre de bloc) par la méthode FDR.

Enfin, pour vérifier la spécificité du transfert par analogie par rapport à une facilitation autre, nous avons exploré si le domaine jouait un rôle dans l'effet de transfert. Pour cela, nous avons utilisé les mêmes analyses mais en décomposant la condition *contrôle* en condition *contrôle DomSim* (où le domaine était similaire à celui de la condition *apprentissage*) et *contrôle DomDif* (où le domaine était nouveau). Dans ces modèles, nous n'avons pas exploré l'effet d'amélioration des performances au cours de la tâche en raison d'une différence entre les nombres d'essais dans les conditions (uniquement 6 pour *contrôle DomSim* et *contrôle DomDif* comparativement à 12 pour les autres condition). Ainsi, nous avons exploré si les

performances (mesurée par le taux de réponses correctes et le TR) variaient selon le facteur condition qui prenait en compte la distinction des essais *contrôle*. Les modèles peuvent être formalisés de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\text{Correct} &= \beta_1 \times \text{condition} + (1|\text{Sujet}) + k \\ \text{RT} &= \beta_1 \times \text{condition} + (1|\text{Sujet}) + k\end{aligned}$$

En cas de significativité du facteur condition, des tests post hocs ont été conduits pour évaluer le sens des effets en comparant les conditions deux à deux et corrigeant les valeurs de p pour le nombre de comparaisons réalisées par FDR, à l'image des analyses post hocs précédentes.

Hypothèse 1B : Réplication du transfert par analogie verbal avec de nouvelles énigmes

L'hypothèse 1B vise à répliquer l'effet de transfert par analogie en utilisant quatre nouvelles énigmes à l'image des études antérieures utilisant le paradigme forteresse/tumeur. En cas de transfert, de meilleures performances à la résolution des énigmes (taux de résolution, TR) étaient attendues si les énigmes étaient précédées d'une énigme analogue comparativement à une situation où la même énigme était donnée seule.

Pour tester cet effet, nous avons comparé le taux de résolution de chaque énigme entre la condition *naïve* et *transfert* en utilisant un test du Chi2 corrigé par méthode de Yates en cas d'effectif observé limité. Nous avons comparé également les TR moyens (toutes énigmes confondues) des solveurs en comparant la condition *naïve* et *transfert*, en utilisant un test non paramétrique de Wilcoxon.

Afin de s'assurer que l'effet de transfert n'était pas influencé par d'autres facteurs, nous avons exploré si le taux de résolution en condition *transfert* dépendait de l'ordre dans lesquels les couples d'énigmes étaient présentés aux participants en utilisant un test du Chi2. Enfin, pour évaluer si le fait de trouver la solution à l'énigme initiale avait un lien avec le fait de trouver la réponse à l'énigme analogue, nous avons évalué également si le taux de résolution de l'énigme analogue dépendait du statut solveur ou non-solveur des participants à l'énigme initiale, en utilisant un test du Chi2. Compte tenu du faible taux de résolution pour les énigmes

initiales, cette dernière analyse a été réalisée en regroupant les quatre énigmes ensemble. Tous les Chi2 étaient corrigés par méthode de Yates en cas d'effectif observé limité.

Hypothèse 2A : La restructuration du problème initiale facilite la résolution d'un problème analogue.

Dans cette hypothèse, nous explorons un mécanisme du transfert par analogie en testant l'effet de restructuration mentale (quantifié par les changements dans les réseaux sémantiques) qui s'opère lors d'une énigme sur le transfert à une énigme analogue.

Pour explorer le lien entre la restructuration du problème initial et la résolution du problème analogue, nous avons utilisé des modèles non linéaires mixtes. Dans ces modèles, la résolution ou non du problème analogue était la variable dépendante (Transfert, variable binaire). Cette variable était aussi séparée en conditions de *transfert spontané* (TS, variable binaire) ou de *transfert dirigé* (TD, variable binaire). Les variables indépendantes comprenaient la restructuration des réseaux sémantiques (Δ Métrique, variable continue), l'importance d'une paire de mot ou d'un mot pour résoudre le problème (impact rating, variable continue) et l'interaction entre ces deux facteurs (Δ Métrique x impact rating). La variable impact rating représentait la pertinence d'une paire ou d'un nœud pour résoudre une énigme donnée (voir Méthode étude 1A) (Bieth et al., 2021). Les variables Δ Métrique et impact rating ont été préalablement normalisées par z-score. Le facteur Sujet a été ajouté dans le modèle comme facteur aléatoire afin de prendre en compte la mesure répétée (maximum deux énigmes par sujet) et la variabilité interindividuelle. Les modèles peuvent être formalisés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Transfert} &= \beta_1 \times \Delta\text{Métrique} + \beta_2 \times \text{impact rating} + \beta_3 \times (\Delta\text{Métrique} \times \text{impact rating}) + \\ & (1 | \text{Sujet}) + (-1 + \Delta\text{Métrique} | \text{Sujet}) + k \\ \text{TS} &= \beta_1 \times \Delta\text{Métrique} + \beta_2 \times \text{impact rating} + \beta_3 \times (\Delta\text{Métrique} \times \text{impact rating}) + \\ & (1 | \text{Sujet}) + (-1 + \Delta\text{Métrique} | \text{Sujet}) + k \\ \text{TD} &= \beta_1 \times \Delta\text{Métrique} + \beta_2 \times \text{impact rating} + \beta_3 \times (\Delta\text{Métrique} \times \text{impact rating}) + \\ & (1 | \text{Sujet}) + (-1 + \Delta\text{Métrique} | \text{Sujet}) + k \end{aligned}$$

Chaque modèle était répété pour chaque métrique calculée (W, Eff, CC et EV). Toutes les analyses ont été réalisées sur Rstudio (v 1.4.1717) avec la fonction *glmer*. Dans ces modèles, un effet de Δ Métrique signifierait que les changements dans l'organisation globale des

réseaux sémantiques (i.e., la restructuration globale) relatif à l'énigme initiale sont en lien avec la résolution de son analogue. Un effet d'interaction Δ Métrique/impact rating signifierait que des changements dans une partie du réseau sémantique considérée pertinente pour trouver la solution de l'énigme initiale (i.e., restructuration locale orientée vers la solution) sont en lien avec la résolution de son analogue.

Hypothèse 2B : La résolution de problèmes analogues est associée à une résolution avec insight.

Dans cette hypothèse, nous proposons de relier la résolution de problèmes analogues et la résolution avec insight. Pour cela, nous avons exploré à l'échelle des réponses dans la condition *transfert* (indépendamment du sujet) si la proportion de Eurêka était différente selon le caractère correct ou incorrect de la proposition, en utilisant un test du Chi².

Résultats

Réplication du transfert par analogie par validation d'une nouvelle tâche expérimentale (hypothèse 1A)

Taux de bonne réponse

En moyenne, les participants avaient 85.2% (SD = 14%) de réponses correctes en condition *apprentissage*, 84.8% (SD = 13.3%) en condition *transfert* et 74.4% (SD = 15.6%) en condition *contrôle*. L'ANOVA a montré un effet principal significatif de la condition ($F(2,3180) = 29.26, p = 2.57 \cdot 10^{-13}$) et un effet d'interaction condition/rang significatif ($F(2,3180) = 3.10, p = .045$) sur le nombre de réponses correctes.

Les analyses post hocs ont révélé que les participants avaient en moyenne plus de réponses correctes dans la condition *apprentissage* et *transfert* comparativement à la condition *contrôle* (*apprentissage vs contrôle* : $F(1,2090) = 42.28, p = 2.96 \cdot 10^{-10}$; *transfert vs contrôle* : $F(1,2090) = 39.91, p = 4.88 \cdot 10^{-10}$) (**Figure 3A**). En revanche les conditions *apprentissage* et *transfert* ne différaient pas significativement ($F(1,2090) = 0.06, p = .81$).

Concernant l'effet d'interaction, les analyses post hocs ne permettent pas de formellement conclure. On retrouve un tendance à observer un effet d'apprentissage plus

important dans la condition *transfert* comparativement à la condition *contrôle* ($F(1,2090) = 5.72, p = .051$) sans différence significative entre les conditions *apprentissage* et *transfert* ($F(1,2090) = 2.76, p = .14$) et *apprentissage* et *contrôle* ($F(1,2090) = 0.80, p = .37$) (**Figure 3B**).

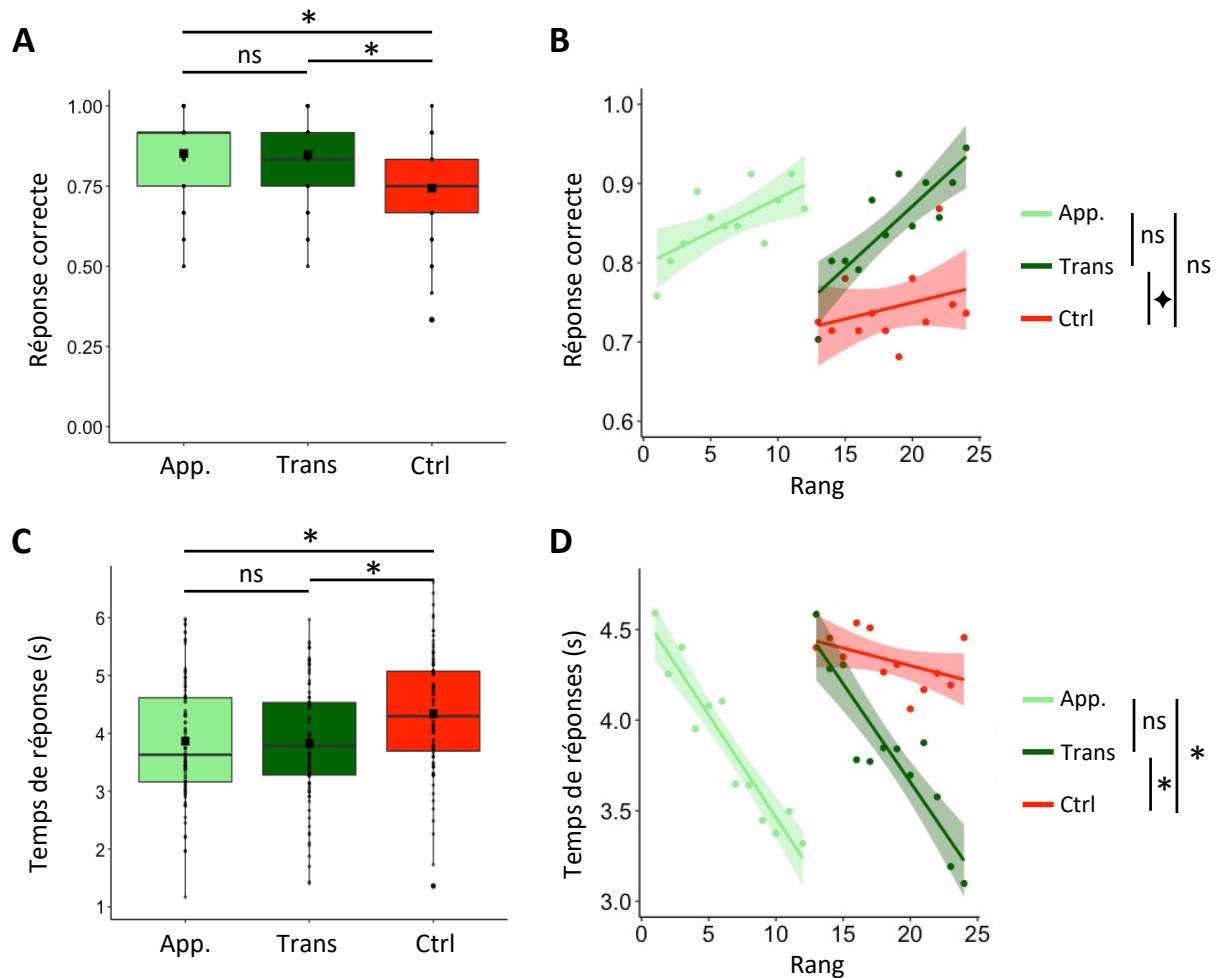


Figure 3. Effet de transfert par analogie capturé par la SATT. A. et C. Performances moyennes au cours de la tâche en termes de pourcentage de réponses correctes (**A**) et de temps de réponse (**C**) selon la condition *apprentissage* (App., en vert clair), *transfert* (Trans, en vert foncé) et *contrôle* (Ctrl, en rouge). Chaque point représente un sujet, les boîtes colorées les quartils supérieurs et inférieurs, la ligne noire la médiane et le carré noir la moyenne. **B. et D.** Courbe d'apprentissage pour chaque condition représentée par le même code couleur. Chaque point représente le nombre moyen de bonne réponse (**B**) et le TR moyen (**D**) à travers les participants en fonction de l'ordre dans lequel les essais sont réalisés après randomisation (Rang). Chaque courbe représente la régression linéaire entre les deux paramètres. * : $p < .05$, \blacklozenge : $p < .10$, ns : non significatif.

Temps de réponse

En considérant uniquement les réponses correctes, le TR moyen était de 3.87s (SD = 1.02s) pour la condition *apprentissage*, de 3.83s (SD = 1.02s) pour la condition *transfert* et de 4.34s (SD = 1.01s) dans la condition *contrôle*. L'ANOVA a montré un effet principal significatif de la condition ($F(2,3061) = 36.27, p = 2.70 \cdot 10^{-16}$) et un effet d'interaction condition/rang significatif ($F(2, 3061) = 14.48, p = 5.51 \cdot 10^{-7}$) sur les TR.

Les analyses post hocs ont révélé que TR moyens étaient plus rapides dans les conditions *apprentissage* et *transfert* comparativement à la condition *contrôle* (*apprentissage vs contrôle* : $F(1,2009) = 50.84, p = 2.10 \cdot 10^{-12}$; *transfert vs contrôle* : $F(1,2003) = 60.07, p = 4.32 \cdot 10^{-14}$) (**Figure 3C**). En revanche les conditions *apprentissage* et *transfert* ne différaient pas significativement ($F(1,2020) = 0.34, p = .56$).

Concernant l'effet d'interaction, les analyses post hocs ont également révélé que l'effet d'apprentissage était plus important dans les conditions *apprentissage* et *transfert* comparativement à la condition *contrôle* (*apprentissage vs contrôle* : $F(1,2009) = 23.02, p = 3.68 \cdot 10^{-6}$; *transfert vs contrôle* : $F(1,2003) = 22.34, p = 3.68 \cdot 10^{-6}$) alors qu'il n'existait pas de différence significative entre les conditions *apprentissage* et *transfert* ($F(1,2020) = 0.01, p = .93$) (**Figure 3D**).

Effet bloc

En utilisant les taux de réponses corrects, les ANOVAs intra bloc ont montré un effet principale significatif de la condition sur la validité de la réponse pour tous les blocs (bloc 2 : $F(1,528) = 14.49, p = 3.16 \cdot 10^{-4}$; bloc 3 : $F(1,505) = 21.66, p = 1.66 \cdot 10^{-5}$; bloc 4 : $F(1,482) = 7.89, p = 7.64 \cdot 10^{-3}$) sauf pour le bloc 1 ($F(1,574) = 2.43, p = .12$). Les ANOVAs utilisant les TR ont montré un effet principal significatif de la condition sur le TR pour tous les blocs (bloc 1 : $F(1,546) = 39.52, p = 2.66 \cdot 10^{-9}$; bloc 2 : $F(1,502) = 35.63, p = 9.04 \cdot 10^{-9}$; bloc 3 : $F(1,497) = 12.93, p = 4.75 \cdot 10^{-4}$) sauf pour le bloc 4 ($F(1,457) = 0.69, p = .41$). Ces résultats suggèrent que l'effet de transfert est significatif dans tous les blocs (i.e., performances moyennes supérieures en condition *transfert* comparativement à la condition *contrôle*), à la fois pour le taux de réponses correctes et le TR pour les blocs 2 et 3, uniquement pour les taux de réponses correctes pour le bloc 1, et uniquement pour les TR pour le bloc 4 (**Figure 4**).

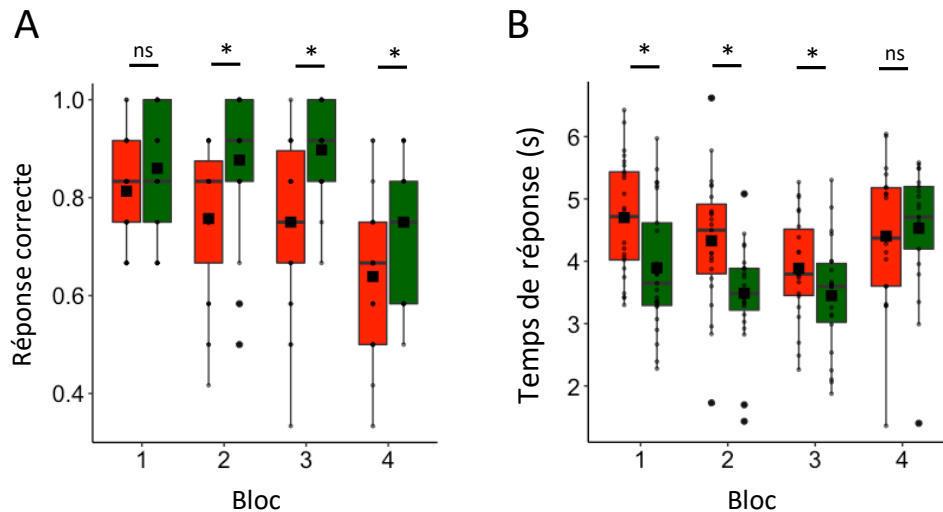


Figure 4. Influence du bloc sur l'effet de transfert. Performances selon le taux de réponses correctes (A) et le TR (B) en fonction des différents blocs, selon la condition *transfert* (en vert) et *contrôle* (en rouge). * : $p < .05$, ns : non significatif.

Différence dans la condition contrôle

En moyenne, les participants avaient 82.2% (SD = 17.5%) de réponses correctes (avec un TR moyen de 4.16s, SD = 1.14s) dans la condition *contrôle DomSim*, et 66.5% (SD = 24.2%) de réponses correctes (avec un TR moyen de 4.52s, SD = 1.10s) dans la condition *contrôle DomDif*. Les ANOVAs ont montré un effet principal significatif de la condition sur le nombre de réponses correctes ($F(3,3178) = 36.12, p < 2 \cdot 10^{-16}$) mais également sur le TR ($F(3,3059) = 29.02, p < 2 \cdot 10^{-16}$).

Concernant le taux de réponses correctes, les analyses post hocs ont révélé que les participants avaient en moyenne plus de réponses correctes dans les conditions *apprentissage* et *transfert* comparativement à la condition *DomDif* (*apprentissage vs DomDif* : $F(1,1544) = 85.08, p = 6 \cdot 10^{-16}$; *transfert vs DomDif* : $F(1,1544) = 83.16, p = 6 \cdot 10^{-16}$) mais également dans la condition *DomSim* comparativement à la condition *DomDif* ($F(1,998) = 38.73, p = 1.43 \cdot 10^{-9}$). En revanche, il n'y avait pas de différence significative entre les conditions *apprentissage* et *transfert* ($F(1,2090) = 0.06, p = .81$), *apprentissage* et *DomSim* ($F(1,1544) = 2.52, p = .17$), *transfert* et *DomSim* ($F(1,1544) = 1.92, p = .20$) (Figure 5A) .

Enfin, concernant les TR, les analyses post hocs ont révélé que les participant étaient en moyenne plus rapides pour répondre dans les conditions *apprentissage* et *transfert* comparativement aux condition *DomSim* et *DomDif* (*apprentissage vs DomSim* : $F(1,1497) =$

13.79, $p = 2.54 \cdot 10^{-4}$; *apprentissage* vs *DomDif* : $F(1,1478) = 66.53$, $p = 2.19 \cdot 10^{-15}$; *transfert* vs *DomSim* : $F(1,1491) = 17.05$, $p = 7.68 \cdot 10^{-5}$; *transfert* vs *DomDif* : $F(1,1472) = 74.47$, $p = 1.20 \cdot 10^{-15}$) mais également dans la condition *DomSim* comparativement à la condition *DomDif* ($F(1,949) = 16.26$, $p = 8.96 \cdot 10^{-5}$). En revanche, il n’y avait pas de différence significative entre les conditions *apprentissage* et *transfert* ($F(1,2020) = 0.34$, $p = .56$) (**Figure 5B**).

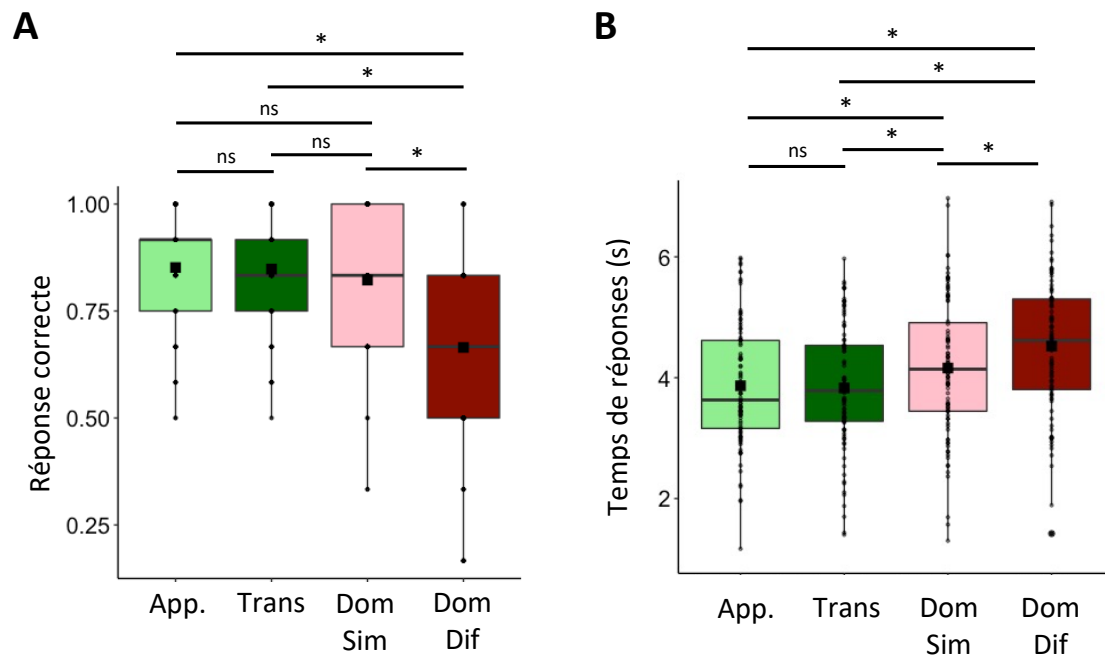


Figure 5. Rôle du domaine dans la SATT. Performances moyennes au cours de la tâche en termes de pourcentage de réponses correctes (**A**) et de TR (**B**) selon la condition *apprentissage* (App., en vert clair), *transfert* (Trans, en vert foncé), *contrôle DomSim* (DomSim, en rose) et *contrôle DomDif* (DomDif, en bordeaux). Chaque point représente un sujet, les boîtes colorées les quartils supérieurs et inférieurs, la ligne noire la médiane et le carré noir la moyenne. * : $p < .05$, ns : non significatif.

Synthèse

Au total, les participants présentaient de meilleures performances (à la fois évaluées sur le taux de réponses correctes et le TR) dans la condition *transfert* comparativement à la condition *contrôle*. Cet effet était globalement peu influencé par le matériel puisqu’il était capturé pour chaque bloc par au moins une des variables comportementales utilisées (taux de réponses correctes et TR). L’effet du transfert était confirmé par la différence de performances toujours marquée entre les essais *transfert* et *contrôle DomDif*. De plus, la

distinction entre les essais *contrôle DomSim* et *DomDif* suggère que le domaine, c'est à dire les similarités superficielles, aident mais pas autant que le transfert par analogie dans la SATT.

Réplication du transfert par analogie en utilisant quatre nouvelles énigmes (hypothèse 1B)

Le test du Chi2 a révélé une dépendance significative entre le fait de résoudre un problème et la condition dans laquelle il était posé (*naïve* ou *transfert*). Le taux de résolution de chaque problème augmentait significativement dans la condition *transfert* comparativement à la condition *naïve* :

- De 6.7% en condition *naïve* (n = 3/45 solveurs, dont 2 avec Eureka) à 52.3% en condition *transfert* (n = 23/44 solveurs, dont 16 avec Eureka) pour l'énigme du Bar ($\chi^2(1) = 22.38, p = 2.24 \cdot 10^{-6}$). Les taux de *transfert spontané* et *dirigé* étaient respectivement de 18% (n = 8/44) et 41% (n = 15/36).
- De 8.2% en condition *naïve* (n = 4/49 solveurs, dont 1 avec Eureka) à 44% en condition *transfert* (n = 22/50 solveurs, dont 10 avec Eureka) pour l'énigme de Daniel ($\chi^2(1) = 16.41, p = 5.10 \cdot 10^{-5}$). Les taux de *transfert spontané* et *dirigé* étaient respectivement de 28% (n = 14/50) et 22% (n = 8/36).
- De 18.4% en condition *naïve* (n = 9/49 solveurs, dont 3 avec Eureka) à 70.2% en condition *transfert* (n = 33/47 solveurs, dont 25 avec Eureka) pour l'énigme de la voiture ($\chi^2(1) = 26.20, p = 3.07 \cdot 10^{-7}$). Les taux de *transfert spontané* et *dirigé* étaient respectivement de 43% (n = 20/47) et 48% (n = 13/27).
- De 28.6% en condition *naïve* (n = 14/49 solveurs, dont 5 avec Eureka) à 76% en condition *transfert* (n = 38/50 solveurs, dont 30 avec Eureka) pour l'énigme de Zoé ($\chi^2(1) = 22.32, p = 2.30 \cdot 10^{-6}$). Les taux de *transfert spontané* et *dirigé* étaient respectivement de 46% (n = 23/50) et 56% (n = 15/27).

Le taux de résolution des énigmes en condition *transfert* ne différait pas selon la position de l'énigme dans le schéma expérimental (Zoé : $\chi^2(1) = 2.6, p = .10$; Voiture : $\chi^2(1) = 0.54, p = .46$; Daniel : $\chi^2(1) = 0.32, p = .57$; Bar : $\chi^2(1) = 2.28, p = .13$). Le taux de résolution toutes énigmes confondues en condition *transfert* ne différait pas selon le statut solveur (74%) ou non-solveur (58%) des participants à l'énigme initiale ($\chi^2(1) = 2.42, p = .12$).

Enfin, le TR moyen des réponses correctes était significativement plus rapide en condition *transfert* (71s, DS = 73s) qu'en condition *naïve* (210s, DS = 183s ; $W = 2492, p = 2.73 \cdot 10^{-4}$).

Au total, lorsqu'une énigme était posée en condition *transfert* (i.e., précédée d'une énigme analogue) son taux et sa vitesse de résolution augmentaient comparativement à la condition *naïve* (i.e., sans énigme analogue avant).

La restructuration du problème initial est associée à la résolution d'un problème analogue (hypothèse 2A)

Par l'utilisation de modèle non linéaire mixte, nous avons exploré si la restructuration de l'énigme initiale (e.g., l'énigme de Zoé) pouvait prédire la résolution de son analogue (i.e., l'énigme de la voiture). Dans ces modèles, la restructuration globale du réseau était représentée par l'effet principale Δ Métrique (changements moyens des métriques par individu), alors que la restructuration locale orientée vers la solution était représentée par l'effet d'interaction Δ Métrique par l'impact rating (changement des métriques selon la pertinence de la paire de mot ou du mot pour résoudre le problème initial).

Concernant la restructuration globale (facteur Δ Métrique), le modèle montrait un effet significatif de Δ CC sur le transfert spontané ($\beta = 0.21, p = 3.23 \cdot 10^{-3}$). Ce résultat indique que plus le réseau sémantique relatif à l'énigme initiale devenait interconnecté (Δ CC augmente), plus la probabilité de résoudre le problème analogue de manière spontanée augmentait. Cependant, ce résultat ne persistait pas lorsque les solveurs de l'énigme initiale étaient retirés ($\beta = 0.20, p = .94$). Aucun autre lien n'a été observé entre Δ Métrique et résolution du problème analogue (tous les résultats des analyses statistiques sont exposés dans la **Table S2**).

Concernant le facteur de restructuration locale (facteur d'interaction Δ Métrique/impact rating), nous avons trouvé que pour le transfert global, il n'existait qu'une tendance statistique indiquant que la résolution du problème analogue (indépendamment du caractère spontané ou dirigé) était associée à une centralité plus importante des mots aidants dans le réseau sémantique relatif à l'énigme initiale (interaction Δ EV x impact rating : $\beta = 0.11,$

$p = .07$). Pour le transfert spontané, le facteur d'interaction Δ Métrique/impact rating était significatif pour W ($\beta = .05, p = .02$) et Eff ($\beta = .06, p = 7.12 \cdot 10^{-3}$), indiquant que résoudre le problème analogue en transfert spontané était associé à un rapprochement des paires de mots aidantes pour résoudre le problème initial. Ces résultats persistaient lorsque les solveurs de l'énigme initiale étaient exclus (W : $\beta = .05, p = .046$; Eff : $\beta = .06, p = .015$). A noter qu'une tendance était observée pour l'EV ($\beta = .14, p = .065$). Enfin, pour le transfert dirigé, le facteur d'interaction Δ Métrique/impact rating était significatif pour EV ($\beta = .18, p = .02$), indiquant que résoudre un problème analogue en transfert dirigé était associé à une centralité plus importante des mots aidants pour résoudre le problème initial. Ce résultat ne persistait pas lorsque les solveurs de l'énigme initiale étaient exclus de l'analyse (EV : $\beta = .10, p = .23$).

En somme, ces résultats suggèrent que plus un individu opérait une restructuration d'un problème initial, plus sa probabilité de résoudre un problème analogue augmentait. Ce résultat était majoritairement porté par la restructuration locale orientée vers la solution du problème initial et la résolution de son analogue en condition spontanée.

La résolution de problèmes analogues est associée à une résolution avec insight (hypothèse 2B)

Dans la résolution de problèmes analogues, les réponses correctes étaient significativement plus associées à un phénomène de Eurêka (69.4%) que les réponses incorrectes (19.4% ; $\chi^2(1) = 124.81, p = 5.60 \cdot 10^{-29}$). Le rapport de Eurêka étant considéré comme un marqueur de résolution avec insight, ce résultat suggère que la résolution de problème analogue est souvent le résultat d'une résolution avec insight.

Discussion

Dans cette étude, nous avons montré (i) que le transfert par analogie visuospatiale pouvait être mesuré par une nouvelle tâche expérimentale (hypothèse 1A) (ii) et permettait de résoudre des nouvelles énigmes (hypothèse 1B). Nous avons en outre démontré que la résolution de problèmes analogues était en lien avec la restructuration du problème initial (hypothèse 2A), et (iv) une résolution avec insight (hypothèse 2B). Dans la suite, nous

discutons comment nos résultats permettent de répliquer mais aussi d'élargir les données existantes et d'étendre le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes, puis de l'apport de la description mécanistique de la restructuration dans le transfert par analogie.

Le transfert par analogie dans la résolution de problème

La Schema Analogy Transfer Task (SATT), une nouvelle tâche capturant les capacités de transfert par analogie.

Dans cette étude, nous avons validé la SATT en montrant que les participants étaient plus performants (taux de résolution et rapidité de réponse) dans les essais où le schéma d'analogie utilisé était préalablement appris (condition *transfert*) comparativement à des essais où ce schéma était nouveau (condition *contrôle*). Cet effet a été observé notamment sur les performances moyennes au cours de la tâche mais également dans les pentes d'apprentissage des TR (uniquement une tendance dans celle des taux de résolution). Cet effet de transfert est confirmé lorsque la condition *contrôle* est différenciée selon la nature du domaine utilisé (*DomSim* ou *DomDif*). L'observation de meilleures performances dans la condition *transfert* comparativement à la condition *contrôle DomDif* confirme bien que l'effet de transfert par analogie dépend du schéma appris. En effet, les conditions *transfert* et *DomDiff* utilisent toutes les deux un domaine non rencontré précédemment, mais le schéma analogique a été appris préalablement dans la condition *transfert* alors qu'il est nouveau dans la condition *contrôle DomDif*. Ce résultat permet de répliquer les études antérieures de transfert par analogie (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; George & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974) en utilisant un matériel visuospatial permettant une approche intra individuelle et l'analyse des performances au cours du temps grâce à la multiplicité des essais.

La condition *contrôle DomSim* suggère par ailleurs que la familiarité du domaine (assimilable à des similarités superficielles avec des problèmes rencontrés antérieurement) aide, mais pas autant que le transfert par analogie. Les TR étaient moins rapides dans la condition *contrôle DomSim* que dans la condition *transfert*, suggérant que l'effet de transfert par analogie restait plus optimal que simplement la similarité du domaine. Dans notre tâche, cette similarité du domaine pourrait faciliter le traitement des stimuli et en conséquence

laisser plus de ressources disponibles pour détecter le nouveau schéma d'analogie. Ce résultat est en accord avec les études antérieures sur le transfert ayant montré l'impact positif des similarités superficielles dans le raisonnement par analogie (Catrambone, 1997; Gentner et al., 1993; Gick & Holyoak, 1980).

En raison du nombre différent d'essais entre les conditions, nous n'avons pas évalué l'effet d'apprentissage entre les conditions *contrôle DomDif* et *DomSim*. Une hypothèse serait la similarité du domaine permet d'aider les performances sur les premiers essais augmentant leur performance moyenne. Cependant, cette similarité du domaine pourrait interférer avec l'apprentissage au cours de tâche. En faisant rappeler le mauvais schéma, ces similarités superficielles pourraient gêner l'apprentissage du nouveau, limitant l'effet d'amélioration des performances au fur et à mesure des essais (Bassok & Olseth, 1995; Novick & Holyoak, 1991; Sander & Richard, 2005).

L'effet de transfert capturé par la SATT semble peu influencé par le matériel. En effet, nous avons contre balancé les domaines et les schémas appris dans quatre blocs différents réalisés par quatre sous-groupes de participants. Nos analyses montrent qu'il existe un effet de transfert dans chaque bloc capturé par au moins une des variables comportementales (taux de réponses correctes ou TR). Ces analyses additionnelles intra bloc ont pu être impactées en termes de puissance statistique (échantillon total sous divisé en quatre) et il n'est pas exclu qu'une variabilité interindividuelle puisse également influencer ces résultats. En particulier, les performances des individus du bloc 4 étaient globalement moins bonnes dans la deuxième partie de la SATT (conditions *contrôle* et *transfert* confondues) que les autres blocs.

La SATT offre également la possibilité de comparer les performances entre les conditions *apprentissage* et *transfert*. Dans notre étude, nous n'avons pas trouvé de différences entre ces deux conditions. Même si cette comparaison ne constitue pas une analyse critique pour la question du transfert par analogie (la condition *contrôle* étant un meilleur contrôle), nous nous attendions à observer de meilleures performances dans la condition *transfert* comparativement à la condition *apprentissage*. Ce non-résultat pourrait être expliqué par l'effet plafond des performances dans la condition *transfert* (taux de résolution proche de 100% et TR rapides) et/ou par la variabilité inter bloc qui peut atténuer des différences. L'absence de différence pourrait être aussi expliquée par la dissimilarité du

domaine d'application du schéma entre les deux conditions. Cette dissimilarité du domaine peut être rapprochée de dissimilarités superficielles. L'absence de similarités superficielles peut être un frein dans le rappel et l'application d'un schéma analogique (Bassok & Olseth, 1995; Novick & Holyoak, 1991; Sander & Richard, 2005). Dans la SATT, le bénéfice du transfert par analogie entre les conditions *apprentissage* et *transfert* pourrait être masqué par la dissimilarité superficielle des stimuli utilisés dans ces deux conditions. Le résultat que nous avons observé pour la condition *contrôle DomSim*, dont les performances étaient meilleures que dans la condition *contrôle DomDif*, est en faveur de cette hypothèse. Pour tester plus directement cette hypothèse, un troisième groupe contrôle pourrait être ajouté avec lequel on testerait l'effet de transfert par analogie dans un domaine identique mais en utilisant des essais différents de la condition *apprentissage*. Dans cette situation, le transfert par analogie pourrait être facilité par la similarité du domaine.

Ainsi, la SATT est une nouvelle tâche expérimentale qui permet de capturer des capacités de transfert par analogie. Elle présente l'avantage d'utiliser un matériel visuospatial permettant d'étendre le transfert par analogie à un matériel non verbal et de faciliter son utilisation par d'autres équipes de recherche non francophones. L'utilisation de multiples essais de résolutions rapides présente également plusieurs avantages. D'abord, cela permet de réaliser des analyses en intra sujet (i.e., chaque sujet réalise toutes les conditions) contrairement aux études antérieures utilisant des énigmes où les analyses sont réalisées en inter sujet (i.e., un groupe de participant naïf est comparé à un groupe d'autres participants ayant connaissance de l'analogie). Cela permet de calculer un score reflétant les capacités de transfert par analogie d'un individu. Ensuite, par la multiplication des essais, il est possible de comparer les performances aux problèmes sources (condition *apprentissage*) par rapport aux autres conditions (*transfert* et *contrôle*), mais également d'analyser plus finement l'effet de transfert par analogie, notamment par l'étude des pentes d'apprentissage pendant la tâche. Enfin, les caractéristiques de cette tâche offrent des perspectives d'application future pour des études de neuroimagerie visant à explorer les corrélats neuronaux du transfert par analogie.

La résolution de problèmes analogues

En utilisant un schéma expérimental similaire aux études antérieures ayant étudié le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes, nous avons répliqué leur résultat en montrant que les taux de résolution des énigmes augmentaient significativement si elles étaient précédées d'un problème présentant un schéma analogique commun (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; George & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). Nous avons montré que l'effet de transfert ne se capturait pas seulement sur le taux de résolution mais également la vitesse de résolution des problèmes. Cet effet n'était pas lié au fait que les sujets ne trouvent pas eux-mêmes la solution à l'énigme initiale. Alors que les études antérieures utilisaient principalement l'effet de transfert du problème de la forteresse sur celui de la tumeur, nous avons utilisé deux nouveaux couples d'énigmes analogues dont le rôle de source ou cible dans le transfert était interchangeable. Ces énigmes correspondaient à des problèmes composés d'un court énoncé verbal ne permettant pas d'obtenir une représentation initiale claire du problème (« *ill defined problem* ») (Reitman et al., 1964), à l'image de ceux de la forteresse et de la tumeur.

Il est à noter que l'effet du transfert spontané sur le taux de résolution était particulièrement marqué dans notre étude. La facilitation du transfert spontané a souvent été en lien avec la présence de similarités superficielles entre les deux problèmes où le transfert s'opère (Catrambone, 1997; Gentner et al., 1993; Gick & Holyoak, 1980). Elles permettraient de faciliter l'évocation analogique du problème initial et ainsi le rappel et l'application du schéma analogique (Holyoak & Koh, 1987; Luger & Bauer, 1978; Reed et al., 1974). Dans notre étude, les couples d'énigmes ne présentaient pas de similarités sémantiques évidentes pouvant être perçues comme des similarités superficielles. En revanche, dans notre étude chaque individu devait résoudre deux couples d'énigmes successivement (contrairement aux études antérieures). Bien que nous n'ayons pas trouvé un effet significatif d'ordre de présentation des énigmes sur les taux de résolution, les individus pourraient avoir inféré qu'une relation similaire existait entre les deux énigmes des deux couples, suggérant que l'indice donné dans le premier couple d'énigme pouvait être appliqué au contexte du deuxième couple d'énigmes. Cette interprétation suggérerait que même dans la condition de *transfert spontané*, certains sujets auraient deviné le lien à établir avec l'énigme initial en inférant l'indice.

Compte tenu de notre schéma expérimental, nous n'avons pas pu clairement évaluer si le taux de résolution en *transfert dirigé* (avec l'indice) était différent de celui en *transfert spontané* (sans l'indice). Dans la condition de *transfert dirigée*, l'indice donné permet de guider le rappel du problème initial permettant ainsi de faciliter l'application du schéma. Dans notre étude, seuls les participants n'ayant pas trouvé la solution en *transfert spontané* étaient comptabilisés dans le calcul du taux de résolution en *transfert dirigé* (biaisant ainsi une comparaison des deux conditions). En revanche, nous avons observé que parmi les participants n'ayant pas résolu le problème en *transfert spontané*, un certain nombre trouvait la solution avec une instruction explicite de penser au problème initial (taux de *transfert dirigé*). Ce résultat suggère donc que donner l'indice permet de récupérer des solveurs additionnels qui n'avaient pas trouvé en *transfert spontané*. Cela va dans le sens des études ayant comparé l'effet d'un transfert dirigé par rapport au transfert spontané (Gick & Holyoak, 1980).

En plus de répliquer l'effet de transfert par analogie dans la résolution de problèmes, ces résultats permettent de confirmer que notre matériel (i.e., les énigmes) et schéma expérimental capturent bien un processus de transfert par analogie. Cette étape confirme que la résolution du problème en position analogue dans notre schéma expérimental relève bien du domaine du transfert analogique, ce qui nous permet d'en étudier l'un des mécanismes dans l'hypothèse suivante.

Le rôle mécanistique de la restructuration dans le transfert par analogie

Pour quantifier la restructuration d'un problème (i.e., les changements dans la représentation d'un problème), nous avons mesuré les modifications qui s'opéraient dans l'organisation de réseaux sémantiques en rapport avec le problème. Cette méthode offre l'opportunité de mesurer des changements de représentation mentale d'un problème et de les mettre en lien avec des processus cognitifs. Dans l'étude précédente de cette thèse, nous avons montré que les changements qui s'opéraient dans des parties du réseaux sémantiques évaluées comme pertinentes pour résoudre le problème étaient associés au fait de trouver sa

solution (Bieth et al., 2021). Ainsi, les processus de restructuration ont été directement mis en lien avec la résolution d'un problème.

Dans la présente étude, nous avons étendu l'utilisation de cette méthode pour démontrer le lien entre la restructuration de la représentation mentale d'un problème initial et la résolution de son analogue. La restructuration était évaluée en utilisant des réseaux sémantiques spécifiques au problème initial (liste de mot spécifique à chaque énigme) et son effet était évalué dans un deuxième temps par la tentative de résolution d'un problème analogue. La restructuration était donc mesurée de manière indépendante de la résolution du problème analogue. Ces éléments nous permettent d'avancer le rôle mécanistique de la restructuration du problème initial dans la résolution d'un problème analogue. Ce résultat est une avancée notable dans le domaine du raisonnement par analogie puisqu'il confirme le rôle clef de la restructuration dans le transfert par analogie, avancé par plusieurs études (Blanchette & Dunbar, 2002; Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Sander & Richard, 2005). La signification exacte de cette restructuration est encore hypothétique. La restructuration du problème initial pourrait permettre d'aider à générer un schéma d'analogie par la création d'une représentation plus abstraite du problème. Cet effort d'abstraction pourrait aider à générer des règles générales permettant d'opérationnaliser le transfert analogique (Gentner, 2005; Gentner & Colhoun, 2010; Gentner & Medina, 1998). L'interprétation du rôle des types de restructurations (globale ou locale) restent encore une question non élucidée.

Le lien entre restructuration du problème initial et résolution du problème analogue était évalué sur l'ensemble des participants quel que soit le statut solveur/non-solveur à l'énigme initiale. Certains résultats ne persistaient pas si les solveurs de l'énigme initiale étaient retirés des analyses. La restructuration d'un problème a été associée à sa résolution (Bieth et al., 2021; Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994). Plus particulièrement, cette restructuration semblait s'opérer avant la résolution du problème (Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994), n'était pas retrouvé à l'échelle des réseaux sémantiques lorsque la solution était donnée au participant (Durso et al., 1994) et ne s'opérerait pas chez les sujets non-solveurs (Bieth et al., 2021; Durso et al., 1994). Ainsi, perdre des résultats en retirant les sujets solveurs (qui présentent une restructuration plus

importante) peut être intuitivement compréhensible. En raison du faible nombre de solveur aux problèmes initiaux, nous n'avons pas pu explorer directement s'il existait une différence de l'effet de la restructuration du problème initial dans la résolution d'un problème analogue selon que les sujets aient trouvé par eux-mêmes la solution à l'énigme initiale. Cette question reste à explorer avec un effectif plus grand ou en repensant le matériel (notamment en utilisant des énigmes moins difficiles). Au contraire, d'autres résultats persistaient en prenant en compte uniquement les non-solveurs à l'énigme initiale. Cela suggère que, malgré une non-résolution du problème initial, une restructuration peut plus ou moins se réaliser et que cette variabilité peut permettre d'expliquer que certains sujets vont trouver la solution à l'énigme analogue.

Plusieurs métriques ont été utilisées pour mesurer la restructuration dans des modalités différentes (spontanée, dirigée ou globale) et uniquement certaines ont montré un lien significatif. Les raisons expliquant ces différences ne sont pas élucidées. Par exemple, le transfert spontané était associé à des changements dans les métriques de liens, tandis que le transfert dirigé était associé à des changements dans une métriques de nœuds. Des travaux spécifiques auprès d'un plus grand nombre de sujets devraient être réalisés pour établir si cette distinction présente un sens en termes des processus cognitifs sous-jacents ou résulte simplement de variabilité de distribution de chaque métrique ou de puissance statistique. Il n'est pas exclu que la petite taille de nos réseaux sémantiques ait pu impacter le calcul et la distribution de certaine métriques.

Enfin, un résultat additionnel concerne celui du lien observé entre résolution de problèmes analogues et rapport de Eurêka, confirmant un lien entre transfert par analogie et résolution avec insight évoqué par plusieurs études (Antonietti & Balconi, 2010; George & Wiley, 2018). En effet, le phénomène de Eurêka est une expérience subjective qui reflète une méthode de résolution avec insight (Bowden et al., 2005; Laukkonen & Tangen, 2018) associé à la production d'idées créatives. Ce résultat permet donc d'établir un lien entre le transfert par analogie et des processus de créativité, à l'image d'études antérieures avançant ou établissant un lien entre raisonnement par analogie et créativité (Green, 2016; Green et al., 2012, 2017; Holyoak et al., 1995; Yang et al., 2022). Certains auteurs associent les processus de restructuration à la résolution avec insight (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999;

MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005). Ce point de vue renforce indirectement les résultats décrit précédemment sur l'implication mécanistique de la restructuration dans le transfert par analogie. Cependant l'implication de processus de restructuration dans la résolution avec insight est débattue (Becker et al., 2020, 2021; Cushen & Wiley, 2012) et la signification du Eurêka dans le transfert par analogie est difficile à interpréter. Elle pourrait être le reflet d'une restructuration du problème analogue (qu'on ne mesure pas ici) ou alors secondaire à l'alignement des représentations des problèmes initial et analogues et la détection de similarités structurelles représentées par une similarité d'organisation des réseaux sémantiques des deux problèmes.

Conclusion

En plus de la réplication des études antérieures sur la résolution de problèmes analogues, nos résultats permettent deux avancées importantes. Premièrement, ils révèlent le rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes analogues, et suggèrent que cette restructuration puisse être un mécanisme de transfert par analogie mesurable par la méthode des réseaux sémantique que nous avons mis au point. Cette description constitue une véritable avancée dans la compréhension des mécanismes du transfert par analogie. Deuxièmement, nos travaux apportent un nouvel outil, la SATT, qui devrait permettre de quantifier les capacités individuelles de transfert par analogie. Cette tâche présente l'avantage d'établir des scores individuels mesurant les capacités de transfert par analogie tant sur les performances moyennes que leur amélioration au cours de la tâche.

Ces résultats ouvrent la voie à d'autres études visant à étudier des facteurs externes pouvant moduler le transfert par analogie à travers le mécanisme de restructuration (mesuré par les réseaux sémantiques) ou encore mesuré par la SATT. Par exemple, le sommeil constitue un facteur d'intérêt en raison de son rôle établi dans les processus de consolidation et d'apprentissage (Diekelmann & Born, 2010; Lewis et al., 2018; Lewis & Durrant, 2011; Paller et al., 2021), en particulier chez l'enfant, mais également son rôle hypothétique dans la réorganisation de ses associations d'idées par processus d'hyper associativité (Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). Relier le transfert par analogie au sommeil permettrait de développer des interventions

ou des adaptations pour aider dans l'acquisition et l'apprentissage de nouveaux concepts (Kurdziel et al., 2013) et faciliter les apprentissages scolaires (Wilhelm et al., 2013).

Référence

- Aichelburg, C., Urbanski, M., Thiebaut de Schotten, M., Humbert, F., Levy, R., & Volle, E. (2016). Morphometry of Left Frontal and Temporal Poles Predicts Analogical Reasoning Abilities. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 26(3), 915-932. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu254>
- Antonietti, A., & Balconi, M. (2010). *Analogical reasoning : An incremental or insightful process ? What cognitive and cortical evidence suggests.*
- Barnett, S. M., & Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? : A taxonomy for far transfer. *Psychological Bulletin*, 128(4), 612-637. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.128.4.612>
- Bassok, M., & Olseth, K. L. (1995). Object-based representations : Transfer between cases of continuous and discrete models of change. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(6), 1522.
- Becker, M., Kühn, S., & Sommer, T. (2021). Verbal insight revisited—Dissociable neurocognitive processes underlying solutions accompanied by an AHA! experience with and without prior restructuring. *Journal of Cognitive Psychology*, 33(6-7), 659-684. <https://doi.org/10.1080/20445911.2020.1819297>
- Becker, M., Wiedemann, G., & Kühn, S. (2020). Quantifying insightful problem solving : A modified compound remote associates paradigm using lexical priming to parametrically modulate different sources of task difficulty. *Psychological research*, 84(2), 528-545.
- Benedek, M., Kenett, Y. N., Umdasch, K., Anaki, D., Faust, M., & Neubauer, A. C. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, 23(2), 158-183. <https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1278034>
- Bernard, M., Kenett, Y. N., Tellez, M. O., Benedek, M., & Volle, E. (2019). *Building individual semantic networks and exploring their relationships with creativity.* 138-144.
- Bieth, T., Kenett, Y., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Lacaux, C., Oudiette, D., & Volle, E. (2021). *Dynamic changes in semantic memory structure support successful problem-solving.*
- Blanchette, I., & Dunbar, K. (2002). Representational change and analogy : How analogical inferences alter target representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(4), 672-685. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.4.672>
- Bowden, E. M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>
- Catrambone, R. (1997). *Reinvestigating the effects of surface and structural features on analogical access.* 90-95.
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2012). Cues to solution, restructuring patterns, and reports of insight in creative problem solving. *Consciousness and Cognition*, 21(3), 1166-1175. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2012.03.013>
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2018). Both attentional control and the ability to make remote associations aid spontaneous analogical transfer. *Memory & cognition*, 46(8), 1398-1412.
- Danek, A. H., Williams, J., & Wiley, J. (2020). Closing the gap : Connecting sudden representational change to the subjective Aha! experience in insightful problem solving. *Psychological Research*, 84(1), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-0977-8>
- Deperrois, N., Petrovici, M. A., Senn, W., & Jordan, J. (2022). Learning cortical representations through perturbed and adversarial dreaming. *ELife*, 11, e76384. <https://doi.org/10.7554/eLife.76384>
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 114-126.
- Durso, F. T., Rea, C. B., & Dayton, T. (1994). Graph-Theoretic Confirmation of Restructuring During Insight. *Psychological Science*, 5(2), 94-98. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1994.tb00637.x>

- Gamo, S., Sander, E., & Richard, J.-F. (2010). Transfer of strategy use by semantic recoding in arithmetic problem solving. *Learning and Instruction, 20*(5), 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.04.001>
- Garner, R. (2005). Humor, analogy, and metaphor : HAM it up in teaching. *Radical Pedagogy*.
- Gentner, D. (2005). The development of relational category knowledge. In *Building object categories in developmental time* (p. 263-294). Psychology Press.
- Gentner, D., & Colhoun, J. (2010). Analogical processes in human thinking and learning. In *Towards a theory of thinking* (p. 35-48). Springer.
- Gentner, D., & Goldin-Meadow, S. (2003). *Language in mind : Advances in the study of language and thought*.
- Gentner, D., & Holyoak, K. J. (1997). Reasoning and learning by analogy : Introduction. *American Psychologist, 52*(1), 32-34. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.52.1.32>
- Gentner, D., & Medina, J. (1998). Similarity and the development of rules. *Cognition, 65*(2-3), 263-297.
- Gentner, D., Rattermann, M. J., & Forbus, K. D. (1993). The roles of similarity in transfer : Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology, 25*(4), 524-575. <https://doi.org/10.1006/cogp.1993.1013>
- George, T., & Wiley, J. (2018). Breaking past the surface : Remote analogical transfer as creative insight. *Insight, 143-168*.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology, 12*(3), 306-355. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90013-4)
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive psychology, 15*(1), 1-38.
- Green, A. E. (2016). Creativity, within reason : Semantic distance and dynamic state creativity in relational thinking and reasoning. *Current Directions in Psychological Science, 25*(1), 28-35.
- Green, A. E., Kraemer, D. J. M., Fugelsang, J. A., Gray, J. R., & Dunbar, K. N. (2012). Neural correlates of creativity in analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 38*(2), 264-272. <https://doi.org/10.1037/a0025764>
- Green, A. E., Spiegel, K. A., Giangrande, E. J., Weinberger, A. B., Gallagher, N. M., & Turkeltaub, P. E. (2017). Thinking cap plus thinking zap : TDCS of frontopolar cortex improves creative analogical reasoning and facilitates conscious augmentation of state creativity in verb generation. *Cerebral Cortex, 27*(4), 2628-2639.
- Gros, H., Thibaut, J.-P., & Sander, E. (2015). *Robustness of semantic encoding effects in a transfer task for multiple-strategy arithmetic problems*. CogSci.
- Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & cognition, 15*(4), 332-340.
- Holyoak, K. J., Thagard, P., & Sutherland, S. (1995). Mental leaps : Analogy in creative thought. *Nature, 373*(6515), 572-572.
- Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. (1999). Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and cognition, 25*(6), 1534.
- Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The cognitive neuroscience of insight. *Annual Review of Psychology, 65*, 71-93. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>
- Krawczyk, D. C. (2012). The cognition and neuroscience of relational reasoning. *Brain Research, 1428*, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.11.080>
- Kurdziel, L., Duclos, K., & Spencer, R. M. (2013). Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(43), 17267-17272.

- Kurtz, K. J., & Loewenstein, J. (2007). Converging on a new role for analogy in problem solving and retrieval : When two problems are better than one. *Memory & cognition*, 35(2), 334-341.
- Landmann, N., Kuhn, M., Piosczyk, H., Feige, B., Baglioni, C., Spiegelhalter, K., Frase, L., Riemann, D., Sterr, A., & Nissen, C. (2014). The reorganisation of memory during sleep. *Sleep medicine reviews*, 18(6), 531-541.
- Laukkonen, R. E., & Tangen, J. M. (2018). How to detect insight moments in problem solving experiments. *Frontiers in psychology*, 9, 282.
- Lewis, P. A., & Durrant, S. J. (2011). Overlapping memory replay during sleep builds cognitive schemata. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(8), 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.06.004>
- Lewis, P. A., Knoblich, G., & Poe, G. (2018). How memory replay in sleep boosts creative problem-solving. *Trends in cognitive sciences*, 22(6), 491-503.
- Llewellyn, S., & Hobson, J. A. (2015). Not only... but also : REM sleep creates and NREM Stage 2 instantiates landmark junctions in cortical memory networks. *Neurobiology of learning and memory*, 122, 69-87.
- Luger, G. F., & Bauer, M. A. (1978). Transfer effects in isomorphic problem situations. *Acta Psychologica*, 42(2), 121-131. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90011-2)
- MacGregor, J. N., Ormerod, T. C., & Chronicle, E. P. (2001). Information processing and insight : A process model of performance on the nine-dot and related problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(1), 176.
- Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14(3), 510-520. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.14.3.510>
- Novick, L. R., & Holyoak, K. J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of experimental psychology: Learning, memory, and cognition*, 17(3), 398.
- Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the psychology of thinking*, 1, 1-44.
- Ovando-Tellez, M., Benedek, M., Kenett, Y. N., Hills, T., Bouanane, S., Bernard, M., Belo, J., Bieth, T., & Volle, E. (2022). An investigation of the cognitive and neural correlates of semantic memory search related to creative ability. *Communications biology*, 5(1), 1-16.
- Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., Bieth, T., & Volle, E. (2022). Brain connectivity-based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eabl4294. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4294>
- Paller, K. A., Creery, J. D., & Schechtman, E. (2021). Memory and sleep : How sleep cognition can change the waking mind for the better. *Annual review of psychology*, 72(1).
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2 : Experiments in behavior made easy. *Behavior research methods*, 51(1), 195-203.
- Reed, S. K., Ernst, G. W., & Banerji, R. (1974). The role of analogy in transfer between similar problem states. *Cognitive Psychology*, 6(3), 436-450. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(74\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90020-6)
- Reitman, W. R., Grove, R. B., & Shoup, R. G. (1964). Argus : An information-processing model of thinking. *Behavioral Science*, 9(3), 270.
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059-1069. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003>
- Sander, E., & Richard, J.-F. (2005). *Analogy and transfer : Encoding the problem at the right level of abstraction*. 1925-1930.
- Schilling, M. A. (2005). A « small-world » network model of cognitive insight. *Creativity Research Journal*, 17(2-3), 131-154.
- Silliman, D. C., & Kurtz, K. J. (2019). Evidence of analogical re-representation from a change detection task. *Cognition*, 190, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.04.031>

- Sprugnoli, G., Rossi, S., Emmendorfer, A., Rossi, A., Liew, S.-L., Tatti, E., di Lorenzo, G., Pascual-Leone, A., & Santarnecchi, E. (2017). Neural correlates of Eureka moment. *Intelligence*, *62*, 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.004>
- Topolinski, S., & Reber, R. (2010). Gaining Insight Into the “Aha” Experience. *Current Directions in Psychological Science*, *19*(6), 402-405. <https://doi.org/10.1177/0963721410388803>
- Urbanski, M., Bréchemier, M.-L., Garcin, B., Bendetowicz, D., Thiebaut de Schotten, M., Foulon, C., Rosso, C., Clarençon, F., Dupont, S., Pradat-Diehl, P., Labeyrie, M.-A., Levy, R., & Volle, E. (2016). Reasoning by analogy requires the left frontal pole : Lesion-deficit mapping and clinical implications. *Brain*, *139*(6), 1783-1799. <https://doi.org/10.1093/brain/aww072>
- Volle, E., Gilbert, S. J., Benoit, R. G., & Burgess, P. W. (2010). Specialization of the rostral prefrontal cortex for distinct analogy processes. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *20*(11), 2647-2659. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq012>
- Weisberg, R. W. (2013). On the “Demystification” of Insight : A Critique of Neuroimaging Studies of Insight. *Creativity Research Journal*, *25*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/10400419.2013.752178>
- Wharton, C. M., Holyoak, K. J., & Lange, T. E. (1996). Remote analogical reminding. *Memory & Cognition*, *24*(5), 629-643.
- Wilhelm, I., Rose, M., Imhof, K. I., Rasch, B., Büchel, C., & Born, J. (2013). The sleeping child outplays the adult’s capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature neuroscience*, *16*(4), 391-393.
- Yang, W., Green, A. E., Chen, Q., Kenett, Y. N., Sun, J., Wei, D., & Qiu, J. (2022). Creative problem solving in knowledge-rich contexts. *Trends in Cognitive Sciences*, S1364661322001565. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.012>
- Zamani, M., & Richard, J.-F. (2000). Object encoding, goal similarity, and analogical transfer. *Memory & Cognition*, *28*(5), 873-886.

Tables supplémentaires

Condition	Schéma	Domaine
Bloc 1		
Apprentissage	Symétrie	Couleur
Transfer	Symétrie	Taille
Contrôle DomSim	Augmentation linéaire	Couleur
Contrôle DomDif	Augmentation linéaire	Barre
Bloc 2		
Apprentissage	Symétrie	Taille
Transfer	Symétrie	Couleur
Contrôle DomSim	Augmentation linéaire	Taille
Contrôle DomDif	Augmentation linéaire	Barre
Bloc 3		
Apprentissage	Augmentation linéaire	Couleur
Transfer	Augmentation linéaire	Taille
Contrôle DomSim	Symétrie	Couleur
Contrôle DomDif	Symétrie	Quantité
Bloc 4		
Apprentissage	Augmentation linéaire	Taille
Transfer	Augmentation linéaire	Couleur
Contrôle DomSim	Symétrie	Taille
Contrôle DomDif	Symétrie	Quantité

Table S1. Schéma expérimental de la SATT. Récapitulatif des différentes combinaisons schéma-domaine utilisées dans la SATT et leur répartition au sein des différents blocs.

Table S2¹⁰. Résumé des analyses statistiques concernant l'hypothèse 2A. Les valeurs de p en gras indiquent des valeurs significatives. Lorsqu'un astérisque est ajouté cela indique que le résultat reste significatif lorsque les solveurs de l'énigme initiale sont retirés de l'analyse.

¹⁰ Cette table est disponible dans la page suivante

		β	SE	z value	p value
Weight					
TS	Δ Metric	3.76e-02	6.52e-02	0.58	.56
	impact rating	-7.18e-04	2.19e-02	-0.03	.97
	Δ Metric x impact rating	5.37e-02	2.22e-02	2.42	.016*
TD	Δ Metric	-0.03	0.06	-0.41	.68
	impact rating	-7.77e-03	0.03	-0.29	.78
	Δ Metric x impact rating	-0.02	0.03	-0.80	.43
Trans	Δ Metric	-0.06	0.04	-1.43	.15
	impact rating	-2.65e-03	0.02	-0.14	.89
	Δ Metric x impact rating	7.83e-03	0.02	0.41	.68
Efficiency					
TS	Δ Metric	0.02	0.08	0.24	.81
	impact rating	-5.17e-03	0.02	-0.24	.81
	Δ Metric x impact rating	0.06	0.02	2.69	7.12e-03*
TD	Δ Metric	-0.05	0.03	-1.91	.056
	impact rating	-4.12e-03	0.03	-0.16	.88
	Δ Metric x impact rating	-0.03	0.03	-1.16	.25
Trans	Δ Metric	-0.07	0.06	-1.24	.21
	impact rating	-6.66e-03	0.02	-0.35	.73
	Δ Metric x impact rating	-9.23e-04	0.02	-0.05	.96
Clustering coefficient					
TS	Δ Metric	0.21	0.07	2.95	3.23e-03
	impact rating	-4.12e-03	0.07	-0.06	.95
	Δ Metric x impact rating	0.07	0.07	1.04	.30
TD	Δ Metric	3.80e-03	0.55	7.00e-03	.99
	impact rating	0.06	0.11	0.52	.60
	Δ Metric x impact rating	0.19	0.14	1.35	.18
Trans	Δ Metric	-0.15	0.40	-0.38	.70
	impact rating	0.02	0.08	0.23	.82
	Δ Metric x impact rating	0.15	0.10	1.48	.14
Eigenvector centrality					
TS	Δ Metric	0.03	0.07	0.39	.70
	impact rating	4.57e-03	0.07	0.07	.95
	Δ Metric x impact rating	0.14	0.08	1.85	.065
TD	Δ Metric	0.06	0.07	0.80	.42
	impact rating	0.02	0.08	0.24	.81
	Δ Metric x impact rating	0.18	0.08	2.32	.02
Trans	Δ Metric	0.02	0.06	0.41	.68
	impact rating	4.94e-03	0.06	0.08	.93
	Δ Metric x impact rating	0.11	0.06	1.83	.07

Partie 2

Mécanismes cérébraux de la résolution de problèmes

Nous avons montré dans les études 1A et 1B que la **restructuration est en lien avec la résolution d'un problème créatif** et avons quantifié cette restructuration à l'échelle de l'individu via des **changements dans l'organisation des réseaux sémantiques** comprenant des mots associés au problème. Dans cette partie, nous nous intéressons aux bases cérébrales de la résolution de problèmes et notamment dans les processus de restructuration. Le matériel basé sur des énigmes utilisé dans partie précédente n'est pas adapté aux méthodes de neuroimagerie qui nécessitent de moyenner le signal associé à un grand nombre d'essais similaires. Pour contourner cet obstacle, nous avons utilisé une tâche de résolution de problème avec insight adaptée aux contraintes de la neuroimagerie, la CAT (Bendetowicz et al., 2017). Si cette tâche ne permet pas de quantifier la restructuration des représentations mentales comme dans la partie précédente, elle nous permet en revanche d'étudier deux processus impliqués dans la résolution de problèmes créatifs en lien avec la restructuration, que sont : (i) la **capacité à associer et combiner des idées éloignées en mémoire sémantique**, et (ii) la **résolution de problème avec insight**.

Résumé détaillé

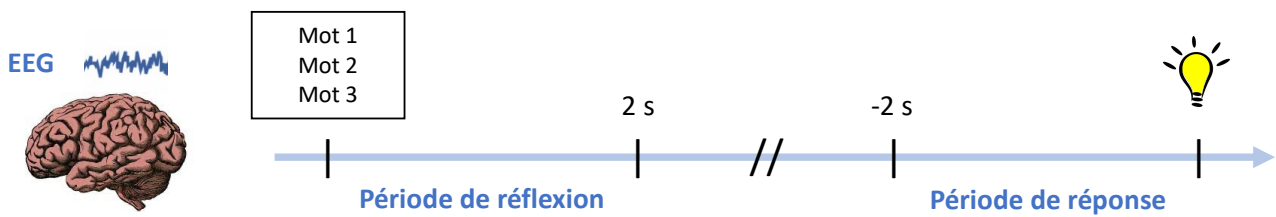
Introduction – La CAT (Bendetowicz et al., 2017) est une tâche de créativité, adaptée de la *Remote Associates Task* (S. A. Mednick, 1962), dans laquelle trois mots sans liens évidents doivent être combinés afin de produire un quatrième faisant un lien entre les précédents. Elle est souvent accompagnée lors de sa résolution d'un phénomène de Eurêka, suggérant sa résolution fréquente avec insight. Dans la CAT, la distance sémantique qui sépare les mots à combiner de la solution attendue est variable, contrôlant ainsi la demande d'évoquer des associations sémantiques éloignées. Ainsi, la CAT permet d'étudier les processus nécessaires pour combiner des mots sémantiquement éloignés (par le contrôle à travers les essais de la

distance sémantique séparant les trois mots du mot solution), mais également ceux impliqués dans la résolution de problème avec insight (par le rapport subjectif d'un phénomène de Eurêka lors de la résolution d'un essai). Ces deux processus sont en lien avec les phénomènes de restructuration associés à la résolution de problèmes créatifs puisqu'ils nécessitent de moduler et créer des liens entre des idées éloignées en mémoire (Durso et al., 1994; S. A. Mednick, 1962; Mumford et al., 1991; Ohlsson, 1984, 1992; Öllinger et al., 2014; Schilling, 2005) et correspond à une étape théorique clef dans la résolution de problèmes avec insight (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999; MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005). Ainsi, l'étude des corrélats neuronaux de la CAT constitue une approche pertinente pour étudier ceux de la restructuration, souvent difficiles d'accès du fait de l'absence de tâches expérimentales adaptées aux méthodes de neuroimagerie pour l'étudier.

La question des corrélats neuronaux associés à la CAT reste aujourd'hui ouverte. La *Remote Associates Task* a principalement été utilisée pour étudier les corrélats neuronaux associés à la résolution de problèmes avec insight (C.-L. Wu et al., 2020), l'effet de l'éloignement sémantique des mots à combiner n'étant quasiment jamais exploré ou considéré dans ces études. Ainsi, il est difficile d'établir des hypothèses fortes sur les mécanismes cérébraux impliqués dans la résolution de cette tâche. De plus, les études en IRM fonctionnelle constituent la principale source de connaissance sur les bases neurales de l'insight (Kuang et al., 2022; W. Shen et al., 2016, 2018; Sprugnoli et al., 2017) laissant de côté les méthodes utilisant l'EEG (Dietrich & Kanso, 2010; Sprugnoli et al., 2017). Or l'approche électrophysiologique, du fait de sa résolution temporelle, permettrait (i) d'apporter des informations sur le déroulement temporel de l'activité cérébrale au cours de la résolution d'un problème créatif tel que la CAT, mais également (ii) de capturer le phénomène de Eurêka très soudain comme en témoigne l'étude princeps de Jung-Beeman et al. (Jung-Beeman et al., 2004). Dans cette étude, les *Remote Associates Task* résolues avec un Eurêka (comparativement à celles résolues sans Eurêka) étaient associées juste avant la réponse à une plus grande puissance spectrale dans les bandes de fréquence alpha et gamma.

Objectifs – L'objectif de cette étude est d'étudier les corrélats EEG associées à deux processus en lien avec la restructuration, capturés par la CAT (**Figure 25**) : l'effet de l'éloignement sémantique des mots à combiner (jamais exploré encore) et d'une résolution avec insight (sur

la base des rares études réalisées). Pour cela, nous utilisons une approche exploratoire, i.e., sans a priori spatial, fréquentiel ou temporel.



Combined Associates Task

- Effet de l'**éloignement sémantique** des mots à combiner
- Effet d'une **résolution avec insight**

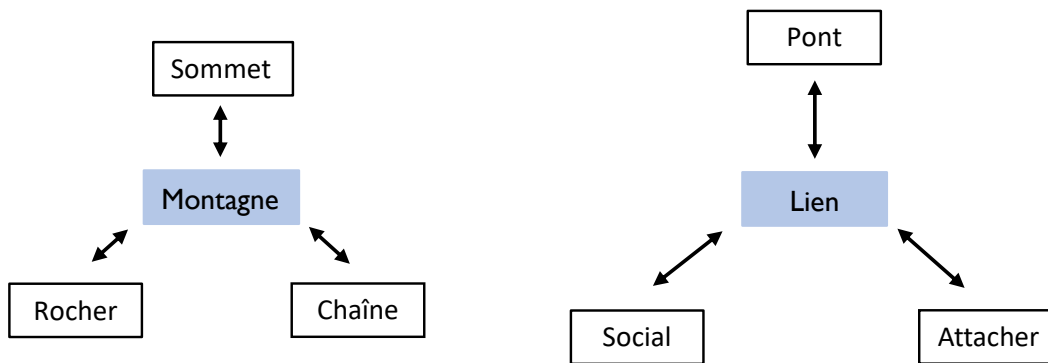


Figure 25. Objectifs de l'étude 2. Décrire les signatures électroencéphalographiques de la CAT (selon l'éloignement sémantique des mots à combiner et la résolution avec insight) par la réalisation d'analyses temps-fréquences dans les 2s suivant l'apparition des mots et les 2s précédant la réponse du sujet.

Méthode – L'activité EEG de 23 sujets a été enregistrée pendant la résolution de 100 essais de la CAT (pouvant être associée ou non à un Eurêka, et présentant une valeur caractérisant la distance sémantique séparant les mots à combiner) (**Figure 25**). La question du lien entre résolution avec insight et l'effet de l'éloignement sémantique a été explorée comportementalement par des modèles logistiques considérant la variabilité inter-individuelle. Des analyses temps-fréquences du signal EEG ont été réalisées entre 3 et 60 Hz sur une la période de réflexion (2 secondes suivant l'apparition des mots à combiner) et de réponse (2 secondes précédant la réponse du sujet), en utilisant uniquement les essais corrects. Par des analyses à deux niveaux, corrigées pour comparaisons multiples par clusters, les variations oscillatoires par bandes de fréquence ont été explorées pour chaque processus

étudiés indépendamment (éloignement sémantique et Eurêka). Enfin, des reconstructions de source centrées sur la fenêtre temporelle des clusters significatifs ont été réalisées dans l'objectif d'approximer la localisation spatiale des effets observés au niveau des électrodes.

Résultats – Plus les mots à combiner dans une CAT étaient proches, plus son taux de résolution augmentait. Les CAT résolues avec un Eurêka avait un temps de réponse moyen plus rapide que celles sans Eurêka. Nous n'avons pas trouvé de lien significatif entre le fait de résoudre une CAT avec un Eurêka et la distance sémantique qui sépare les mots à combiner. Au sein des réponses correctes, plus les mots à combiner étaient sémantiquement éloignés, plus l'amplitude oscillatoire des fréquences alpha (8-12Hz, électrodes pariéto-temporales gauches) et bêta (13-30 Hz, électrodes fronto-temporales droites) augmentait dans la période de réflexion, ainsi que des fréquences thêta (3-8 Hz, électrodes frontales) dans la période de réponse. La résolution de problèmes avec insight était associée à des variations oscillatoires uniquement pendant la période de réponse. Les essais avec Eurêka (comparativement à ceux sans Eurêka) présentaient successivement une plus grande amplitude oscillatoire dans la bande de fréquence alpha (électrodes temporales gauches) puis gamma (électrodes temporo-pariétales gauches, 31-60 Hz), puis thêta (électrode frontales et centrales). Les reconstructions de sources réalisées dans les fenêtres temporelles de ces clusters ont permis d'établir des hypothèses sur la localisation cérébrale de ces effets.

Conclusion – L'effet de l'éloignement sémantique entre les mots à combiner et la résolution de problèmes avec insight semblent (i) être indépendants, et (ii) avoir des signatures électrophysiologiques spécifiques comme en témoignent leurs corrélats neuronaux respectifs. Ces résultats permettent de poser des hypothèses sur les mécanismes cérébraux impliqués dans les processus de restructuration qui pourraient être directement testés.

Article

Cette étude a été réalisée en **collaboration** avec le Dr **Nathalie George**. Cet article est en processus de soumission et a fait l'objet de plusieurs communications affichées en congrès international (congrès annuel de la *Cognitive Science Society* et de l'*International organization of psychophysiology*).

Time course of EEG power during creative problem-solving with insight or remote thinking

Théophile Bieth^{1,2}, Marcela Ovando-Tellez¹, Alizée Lopez-Persem¹, Beatrice Garcin^{1,3}, Laurent Hugueville¹, Katia Lehongre¹, Richard Levy^{1,2}, Nathalie George^{1,4*}, Emmanuelle Volle^{1*}

Affiliations:

1: Sorbonne Université, Institut du Cerveau - Paris Brain Institute - ICM, Inserm, CNRS, APHP, Hôpital de la Pitié Salpêtrière, Paris, France

2: Sorbonne Université, Institut du Cerveau - Paris Brain Institute - ICM, Inserm, CNRS, AP-HP, Hôpital de la Pitié Salpêtrière, DMU Neurosciences, Paris, France

3: Neurology Department, Avicenne Hospital, AP-HP, Bobigny, France

4: Institut du Cerveau - ICM, Inserm U1127, CNRS UMR7225, Sorbonne Université, Centre MEG-EEG, CENIR, 75013, Paris, France.

*Equal contributors

Corresponding authors:

Emmanuelle Volle : emmavolle@gmail.com

Théophile Bieth: theo_bieth@hotmail.fr

Keywords:

Creativity, Eurêka, insight problem-solving, semantic distance, EEG, time-frequency, source reconstruction

Abstract

Problem-solving often requires creativity and is critical in everyday life. However, the mechanisms underlying creative problem-solving remain poorly understood. We examined EEG activity during an adapted version of a classical insight problem task, the Remote Associates Test, that requires finding a word connecting three words. It allowed us to explore *remoteness in semantic associations* (by varying the remoteness of the solution) and *insight solving* (identified as a "Eurêka" moment). *Semantic remoteness* was associated with early synchronization in alpha and beta bands in left laterotemporal and right temporoparietal clusters and late frontal activity in the theta band just before the participants responded. *Insight* was associated with synchronization in alpha and gamma bands in left temporal clusters and a frontal synchronization in the theta band just preceded the response. Source reconstructions highlight the brain regions associated with these clusters. Our findings shed new light on the dynamic mechanisms involved in creative problem-solving.

Introduction

Solving problems can be a societal challenge, an opportunity for progress, or a personal concern. We constantly have to find solutions to new problems and adapt ourselves to new situations, from the everyday life (e.g., how to reorganize my workspace at home), to worldwide concerns (e.g., how to avoid global warming). Problem-solving requires creativity (called here creative problem-solving) when there is no obvious or previously established rule to solve a newly encountered problem or when the heuristics or rules that we spontaneously use are inefficient or lead to an impasse. In creative problem-solving, we need to change our mental representation of the problem by recombining the elements of the problem in new ways or finding new connections between seemingly unrelated elements. In some cases, the solution comes to mind suddenly and spontaneously, with a "Eurêka" phenomenon (Topolinski & Reber, 2010). This problem-solving type is usually considered insight solving (Weisberg, 2013; Kounios & Beeman, 2014). It relates to the illumination phase of the creative process model developed from the reports of eminent scientific discoveries or artistic creations (Wallas, 1926). Combining remote elements and insight solving are considered as central aspects of creative thinking but the underlying neurocognitive mechanisms are still poorly understood. Are these two aspects related? What happens in the brain when solving a problem requires combining remote concepts or elicits a "Eurêka" experience? Here, we explore these questions using EEG during a problem-solving task assessing creative abilities.

Combining remote elements is a core component of the associative theory of creativity proposed by Mednick (Mednick, 1962). According to his approach, creativity relies on the ability to form new combinations from unusual associations. Mednick's theory was operationalized in the Remote Associates Test (RAT) that consists in finding a word connecting three given unrelated cue words (Mednick, 1962). The RAT is a creative problem-solving task: it requires forming a new combination of distant elements of knowledge, and it often elicits an experience of insight or "Eurêka" in participants (Bowden et al., 2005; Topolinski & Reber, 2010; Kounios & Beeman, 2014). Several versions of the RAT have been developed using lexical (compound words) (Bowden & Jung-Beeman, 2003) or semantic associations between the cue words and the solution (Oltețeanu et al., 2019), or using pictures instead of words (Oltețeanu & Zunjani, 2020; Becker & Cabeza, 2021). Our lab developed a semantic associative

version of the task (the Combined Associates Task, CAT) (Bendetowicz et al., 2017, 2018) in which we controlled the semantic association strength (SAS) between the expected solution and the three cue words. The CAT allows us to test Mednick's hypothesis, according to which the more remote the elements to be combined, the more creative the process (Mednick, 1962).

A previous lesion study identified two distinct brain regions and networks as critical to CAT-solving when remoteness increases (Bendetowicz et al., 2018). First, the medial prefrontal cortex (PFC) as part of the default mode network, a network related to spontaneous cognition and associative thinking (Andrews-Hanna et al., 2010, 2014), was critical for the spontaneous generation of remote associates. Second, the rostro-lateral part of the PFC involved in the executive control network (Yeo et al., 2011; Power & Petersen, 2013) was critical for combining remote associates. These results are consistent with the associative theory of creativity but also emphasizes the importance of controlled processes during CAT-solving (Jones & Estes, 2015). They converge with findings from functional connectivity on divergent thinking in healthy subjects (Beaty et al., 2016), extend them to convergent thinking tasks (CAT), and demonstrate the necessity of both networks. Hence, their findings offer new light on the neural correlates of combining remote associates, while most previous neurocognitive studies that used RAT-like tasks focused on the insight phenomenon (Wu et al., 2020).

RAT-like tasks are helpful to explore insight solving because they provide multiple short trials, allowing to compare trials with and without insight, and better fit the constraints of neuroimaging studies than other insight problem-solving tasks (e.g., riddles). Currently, the subjective report of Eureka experience during problem-solving, on a trial-by-trial basis, is the most common measure used to study insight (Laukkonen & Tangen, 2018). The Eurêka corresponds to the subjective experience that arises when the solution comes to mind suddenly and effortlessly, without being able to report the mental steps leading to it. According to some insight theories (Sprugnoli et al., 2017), the Eurêka moment may follow an initial failure to solve the problem due to reaching a mental impasse and overcoming it with a reorganization of the problem representation (Ohlsson, 1992).

The critical question of the neural underpinnings of insight problem-solving remains unanswered. A few studies explored the brain correlates of insight problem-solving using functional MRI and reported the involvement of frontal regions (anterior and posterior cingulate cortex, inferior frontal gyrus), temporal regions (temporo-polar region, superior and middle temporal gyri, hippocampus) and the insula, during RAT-like tasks (Luo & Niki, 2003; Jung-Beeman et al., 2004; Anderson et al., 2009; Subramaniam et al., 2009; Aberg et al., 2016; Tik et al., 2018; Becker et al., 2020) or other insight tasks (Aziz-Zadeh et al., 2009; Dietrich & Kanso, 2010; Qiu et al., 2010; Shen et al., 2016; Lin et al., 2018). Electrophysiological methods such as EEG provide invaluable information on the time course of information processing and brain dynamics associated with cognitive processes. They thus have the potential to capture the suddenness of Eurêka experience (Jung-Beeman et al., 2004; Sandkühler & Bhattacharya, 2008). A pioneering study reported that RAT trials solved with Eurêka (compared to trials without Eurêka) were associated with a power increase in the alpha band in the right parieto-occipital areas around 1.5s before the subject's response, followed by a gamma burst in the right antero-superior temporal lobe 0.3s before the subject's response (Jung-Beeman et al., 2004). Alpha and gamma oscillations have been associated with insight solving in other studies that used the RAT (Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Luft et al., 2018) and other paradigms (Sheth et al., 2009; Rosen & Reiner, 2016; Oh et al., 2020). Independently of insight solving, two studies reported a power increase in theta band in prefrontal electrodes and beta band in fronto-temporal electrodes when contrasting RAT-solving with a simple word generation task (Razumnikova, 2007) or a category fluency task (Danko et al., 2009).

Overall, the few existing neuroimaging studies of creative problem-solving focused mainly on insight, and none of them explored the effect of the remoteness of the elements to be combined. In addition, most EEG studies restricted their analyses to specific frequency bands or groups of electrodes. Hence, previous studies do not draw homogeneous conclusions on the brain mechanisms involved in creative problem-solving, including in RAT-like tasks. Here, we aim to better understand the neurocognitive mechanisms of creative problem-solving by jointly exploring the EEG correlates of the effects of *associative remoteness* and *insight solving*. For this purpose, we used the CAT (Bendetowicz et al., 2017, 2018), where the *remoteness* of the solution word varies across trials, and *insight* was explored by collecting subjective reports of Eurêka on a trial-by-trial basis. Since EEG data using the RAT are

heterogeneous in the literature (Dietrich & Kanso, 2010) and the effect of *semantic remoteness* has not been investigated, we used an exploratory approach with no spatial, temporal, or frequency a priori. We hypothesized that the effects of *remoteness* and *insight solving* are associated with distinct brain EEG activities in space and time.

Results

Behavioral data

We recorded the EEG activity of 23 participants performing the CAT (100 trials). On each trial, participants had up to 30s to find a word that connects three unrelated words. Then they reported if they solved the trial with a Eurêka (**Figure 1**; see *Method*). Each trial was characterized by a semantic association strength (SAS) value (reflecting the semantic distance between the cue words and the expected solution; continuous variable determined by the material and fixed between subjects) and categorized according to how the subject solved it (with or without Eurêka; binary variable that depends on each subject).

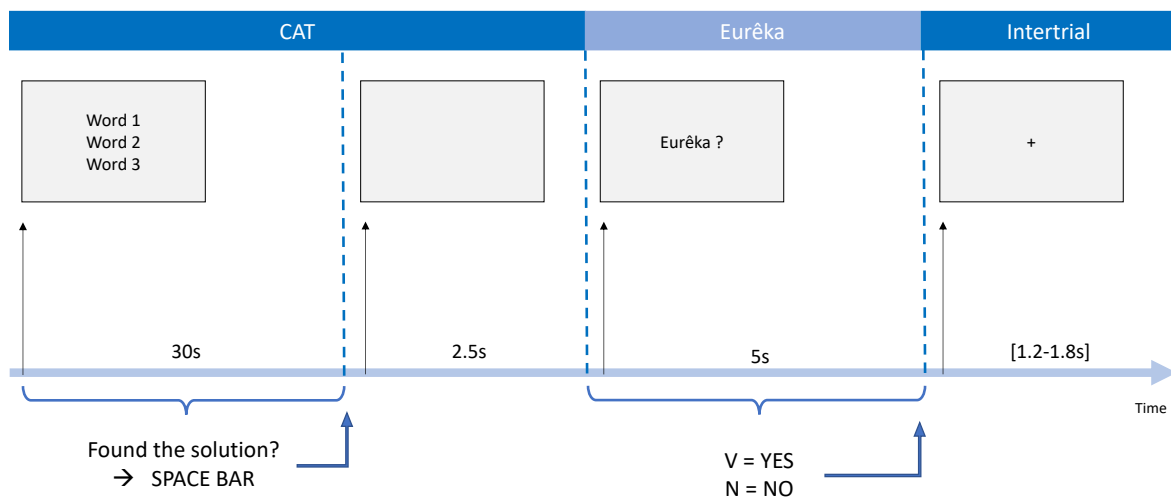


Figure 1. Summary of the CAT procedure. Experimental design of the CAT. Each trial starts with the presentation of three unrelated words, vertically displayed on a grey screen for up to 30s. The participants press the space bar as soon as they think they have the solution, triggering the display of a blank screen during 2.5s. They verbalize their response during this period. Then, the question "Eurêka?" is displayed on the screen, and the participants indicate whether the solution that they just gave came to their mind with a Eurêka, using the keyboard letters "V" (yes) and "N" (no), within a time limit of 5s. Finally, a fixation cross is displayed on the screen for a random time before beginning a new trial (intertrial interval ranges between 1.2 and 1.8s).

Overall, mean accuracy across individuals was 57.4% (SD = 12.0), and mean RT was 8.4s (SD = 1.0). Across trials, the percentage of participants who gave a correct response correlated significantly positively with SAS (**Figure 2A**, $\rho = 0.48$, $p = 3.85 \cdot 10^{-7}$), indicating that the closer the solution was, the more individuals found it. The correlation between the mean RT for correct responses across trial and SAS was negative and marginally significant (**Figure 2B**, $\rho = -0.20$, $p = 0.051$).

On average, the participants reported a Eurêka in 55.6% (SD = 20) of correct trials (and in 22.7% (SD = 16.4) of incorrect trials), whereas they declared no Eurêka in 44.1% (SD = 21.1) of correct trials (and in 49.1% (SD = 20.5) of incorrect trials). Within correct trials, the percentages of Eurêka and no Eurêka did not statistically differ ($W = 149$, $p = 0.26$; **Figure 2C**). However, mean RT in trials correctly solved with Eurêka were significantly shorter than mean RT in trials solved without Eurêka (respectively, 6.8s (SD = 2.1) and 11.4s (SD = 3.8), $W = 15$, $p = 1.30 \cdot 10^{-3}$, **Figure 2D**).

We examined how *semantic remoteness* related to Eurêka reports by computing logistic regressions at the individual level (see method). The results show no significant effect of SAS (orthogonalized from RT) on Eurêka reports in any individual (**Figure S1A**). At the group level, the one-sample t-test of the individual regression coefficients was not significant (mean=0.004, SD=0.01, $t(20) < 1$, $p = 0.70$; **Figure S1B**).

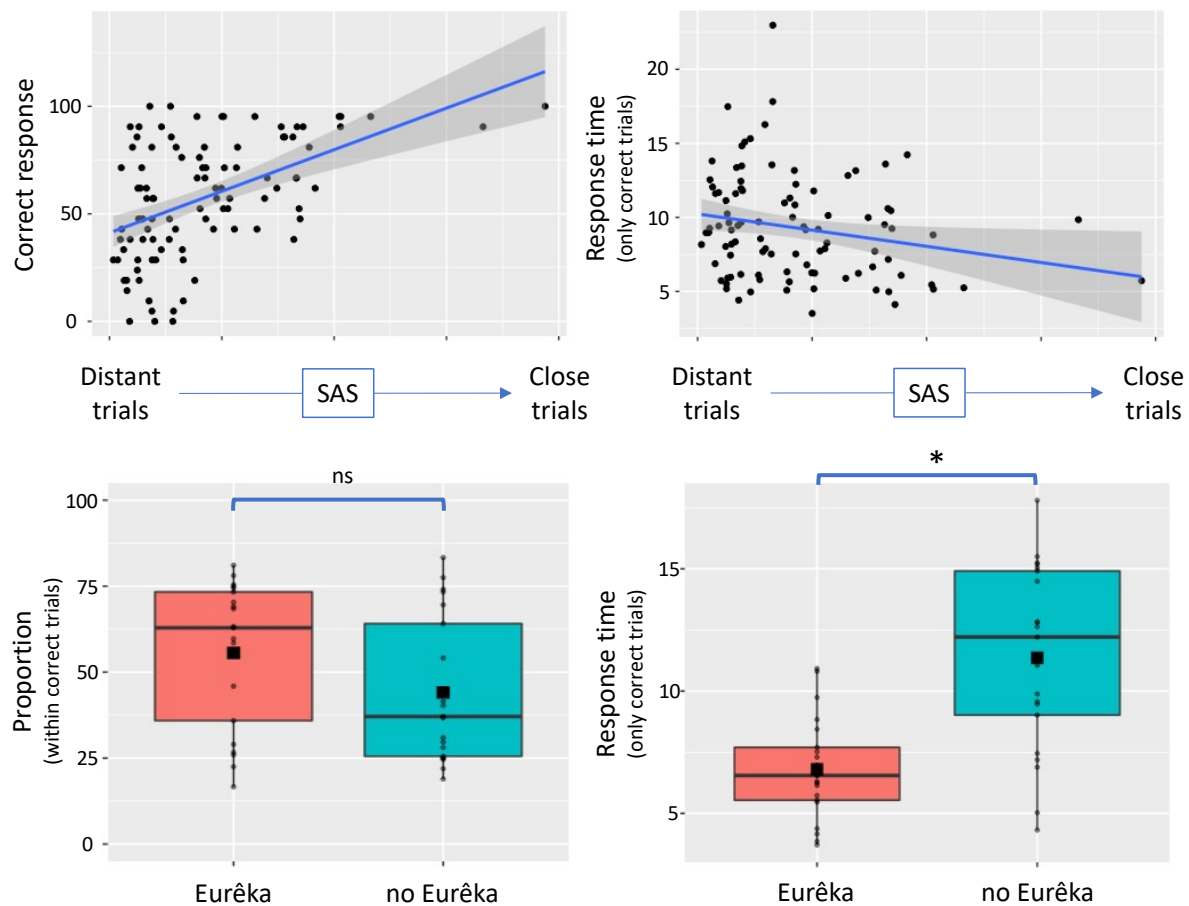


Figure 2. Behavioral results. **A.** Percentage of participants with correct responses per trial as a function of SAS. Each dot represents a trial, and the blue line represents the regression line between the two variables ($\rho = 0.48$, $p = 3.85 \cdot 10^{-7}$). **B.** Averaged RT per trial as a function of SAS. Each dot represents a trial, and the blue line represents the regression line between the two variables ($\rho = -0.20$, $p = 0.051$). **C.** Percentage of Eurêka (in red) and no Eurêka (in blue) within the correct trials. Each dot represents a subject, color boxes represent the upper and lower quartiles, the black horizontal line within the boxes symbolizes the median, and the filled square is the mean value across subjects. **D.** Averaged RT of correct trials with Eurêka (in red) and without Eurêka (in blue). Same legend as in **C.** ns: non-significant, *: $p < 0.05$.

EEG

Time-frequency analyses were computed between 3 and 60Hz during the 2s period following the onset of the word triplet (initial time window) and the 2s period preceding the participant's response (response time window; see method). Time-frequency maps were averaged along the frequency dimension according to four frequency bands (i.e., theta 3-7 Hz, alpha 8-12 Hz, beta 13-30 Hz, and gamma 31-60 Hz).

The average number of trials included in the EEG analyses (non-artifacted correct trials with $RT > 4s$) for the initial and response time windows was, respectively, 32.1 (SD=11.5) and 32 trials (SD=11.7) for *semantic remoteness* condition, and 30.3 (SD=12) and 29.4 trials (SD=11) for the in *insight solving* condition. The time-frequency maps of EEG power across all trials are shown in **Figure S2** for each time window of interest, including topographical maps for each frequency band.

To explore the neurophysiological correlate of *semantic remoteness* and *insight solving*, we used a two-level statistical analysis approach. First, individual linear regressions assessed the relation between EEG power in each frequency band and behavior with EEG power as the dependent variable and i) semantic distance as the independent variable to explore the effect of *semantic remoteness*, ii) Eurêka self-report as the independent variable to explore *insight solving*. Then the resulting individual regression coefficients were tested at the group level (one-sample t-tests) with cluster-based corrections for multiple comparisons in spatial (65 electrodes) and time dimensions. These analyses were performed for each time window (see method).

Finally, we used source localization to explore the brain regions associated with the significant clusters observed at the sensor level. For this, we analyzed the cortical sources in the time windows and the frequency bands in which significant clusters were found.

Semantic remoteness in associative combination

We found three significant negative clusters (i.e., the lower the SAS, i.e., the more remote the solution, the higher the power in the considered frequency band) (**Figure 3**). No positive clusters were found.

Two significant clusters were observed during the initial time period. A first negative cluster was observed in the alpha band on left temporal and parietal electrodes, from 1.29 to 1.99s after the onset of the cue words (11 electrodes, $\text{sum}(t) = -1523$, $p_{\text{corr}} = 5.99 \cdot 10^{-3}$) (**Figure 3**, "alpha" in orange). We performed a source reconstruction of alpha band activity during the cluster time window and contrasted the cortical source maps between distant and close trials. The largest source differences in alpha band between 1.29 and 1.99s were located in the left

inferior temporal gyrus and the left anterior part of the middle temporal gyrus. We also observed source differences in alpha band activity in the right hemisphere in the anterior part of the inferior and middle temporal gyrus and the right pre- and post-central gyrus (**Figure S3A**).

A second negative cluster was observed in the beta band during the initial time window. It was formed from two subsets of electrodes over time. Beta activity increased with *remoteness* first on central electrodes from 1.47 to 1.70s after the cue words onset (6 electrodes, $\text{sum}(t) = -421$, $p_{\text{corr}} = 0.03$) (**Figure 3**, "beta" in light green) and second on temporo-frontal electrodes from 1.78 to 1.99s (7 electrodes, $\text{sum}(t) = -554$, $p_{\text{corr}} = 0.02$) (**Figure 3**, "beta" in dark green). We performed source reconstruction in the beta band during these two time periods separately. Between 1.47 and 1.70 s, the distant versus close contrast revealed sources located in bilateral posterior middle temporal gyrus. In addition, there was reduced beta activity for distant than close trials in the left anterior part of the middle frontal gyrus (**Figure S3B**). Between 1.78 and 1.99s, the sources showing differentiated beta band activity for remote versus close trials were located in similar regions (**Figure S3C**): beta power was higher in distant than close trials in a potential source located in the left posterior inferior temporal gyrus and was lower in the left posterior and inferior gyrus encompassing the left inferior frontal sulcus.

The third negative cluster was observed in the theta band during the response time window (-1.80 to -1.06s before the response) on prefrontal electrodes (15 electrodes, $\text{sum}(t) = -2574$, $p_{\text{corr}} = 2.00 \cdot 10^{-3}$) (**Figure 3**, "theta" in yellow). As for the previous clusters, we reconstructed the sources of theta band activity in the cluster time period. Contrasting distant versus close trials revealed sources located in the right inferior part of pre- and post-central gyrus and in several regions in the left hemisphere, including the lateral part of the orbital gyrus and the anterior part of the inferior frontal gyrus, the inferior pre- and post-central gyrus, the posterior part of the superior temporal gyrus and posterior and anterior temporal areas (**Figure S3D**).

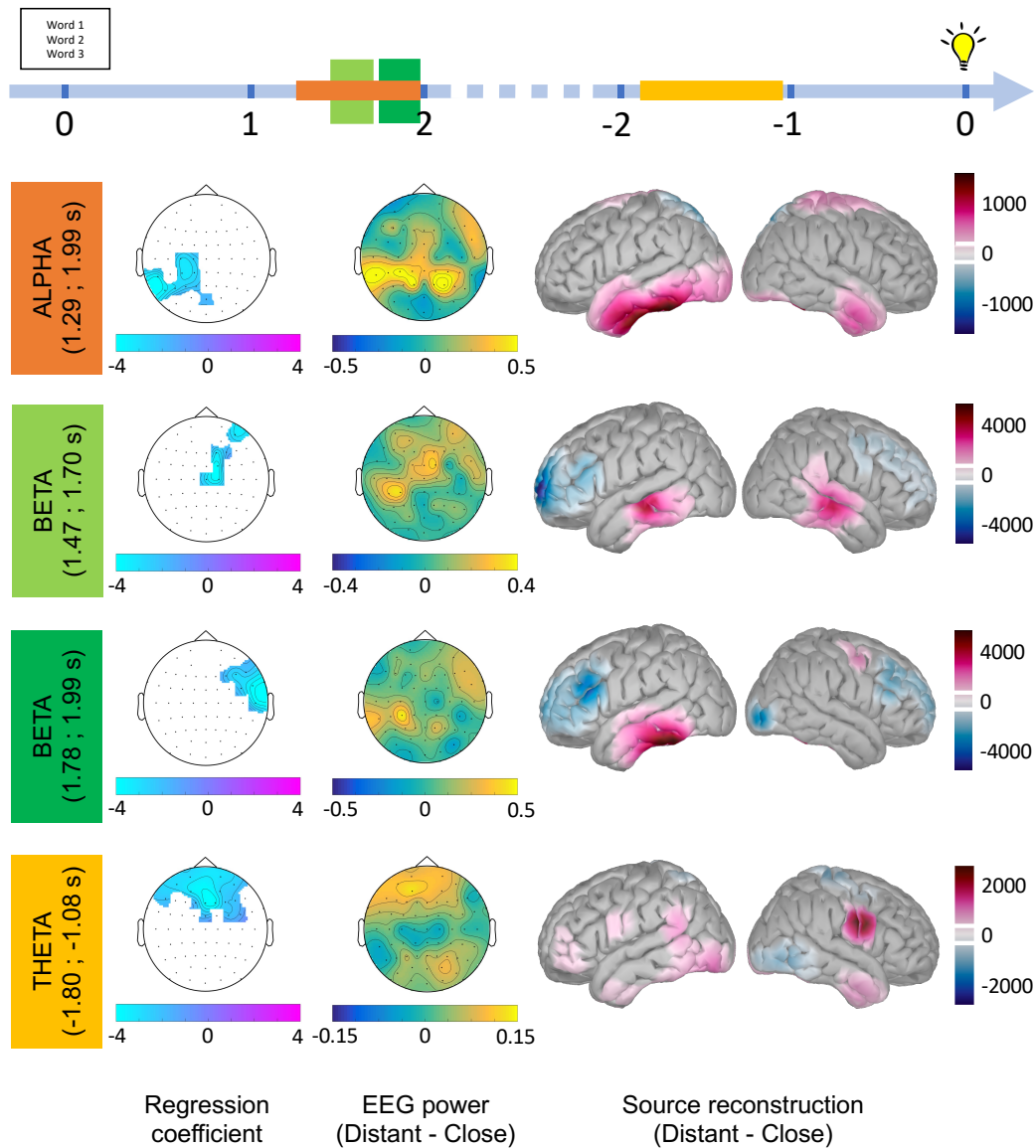


Figure 3. EEG effects related to the remoteness of semantic associations. **Top:** Time course (in second) of the task with the two time windows of interest (initial time window between 0 and 2s after the onset of the cue words, and response time window between -2 and 0 s before the response). Colored rectangles symbolize the time period where clusters significantly associated with the remoteness of semantic associations were observed in the alpha band (in orange), beta band (in light and dark green), and theta band (in yellow). For each cluster, the results are further detailed as follows. **First column:** Topographical maps of the clusters. The significant clusters ($p_{corr} < 0.05$) are represented for each frequency band. The color codes the regression coefficient values in the significant clusters (color bar from negative values in light blue to positive values in purple). **Second column:** Topographical maps of the EEG power in each band contrasted between distant (with low SAS values) minus close (with high SAS) trials, averaged across subjects and in the time-windows of the clusters (as indicated in the colored rectangles on the left). Color bars indicate EEG power (z-score of dB) from negative (in blue, distant < close) to positive (in yellow, distant > close) values. **Third column:** Source reconstruction of EEG activity in each frequency band during the significant cluster time periods. The cortical source maps were contrasted between conditions (distant - close), and we represent the difference in source activity, for each frequency, averaged in the time window of the cluster. The color bar indicates the power (in pA.m) from negative (in blue) to positive (in purple) values. The white lines in the color bars indicate the threshold used to visualize the source on the normalized cortical surface rendering.

Insight problem-solving

We found three significant positive clusters, where trials solved with a Eurêka were associated with significantly higher activity amplitudes than those solved without a Eurêka. All clusters were observed in the response time window (**Figure 4**). No negative clusters were found.

The first positive cluster was observed in the alpha band frequency in left central and temporal electrodes, between -1.96 and -1.55s before the response button press (13 electrodes, $\text{sum}(t) = 1174$, $p_{\text{corr}} = 0.01$) (**Figure 4**, "alpha" in orange). The source reconstruction of EEG activity in the alpha band during the time window of this cluster showed increased alpha activity of sources mainly located in the left superior parietal lobule and posterior part of the inferior and middle temporal gyrus. Additionally, sources' alpha activity was reduced in the right occipital polar cortex when participants reported a Eurêka (**Figure S4A**).

The second positive cluster overlapped temporally with the end of the first cluster during the response window (-1.74 to -1.55s before the response) and was found in the gamma band in left parieto-temporal electrodes (9 electrodes, $\text{sum}(t) = 372$, $p_{\text{corr}} = 7.99 \cdot 10^{-3}$) (**Figure 4**, "gamma" in green). The source reconstruction of EEG activity in the gamma band during the time period of this cluster showed increased gamma activity for Eurêka relative to no Eurêka trials in the left anterior superior frontal gyrus, around the inferior frontal sulcus (encompassing posterior part of inferior and middle frontal gyrus) and left middle temporal gyrus (**Figure S4B**).

The last positive cluster was observed in the theta band on centro-frontal electrodes from -1.62 to -1.06s before the response (14 electrodes, $\text{sum}(t) = 1377$, $p_{\text{corr}} = 7.99 \cdot 10^{-3}$) (**Figure 4**, "theta" in yellow). During the cluster time window, the source reconstruction of EEG activity in the theta band showed greater theta activity in the inferior part of the right pre- and post-central gyrus (**Figure S4C**).

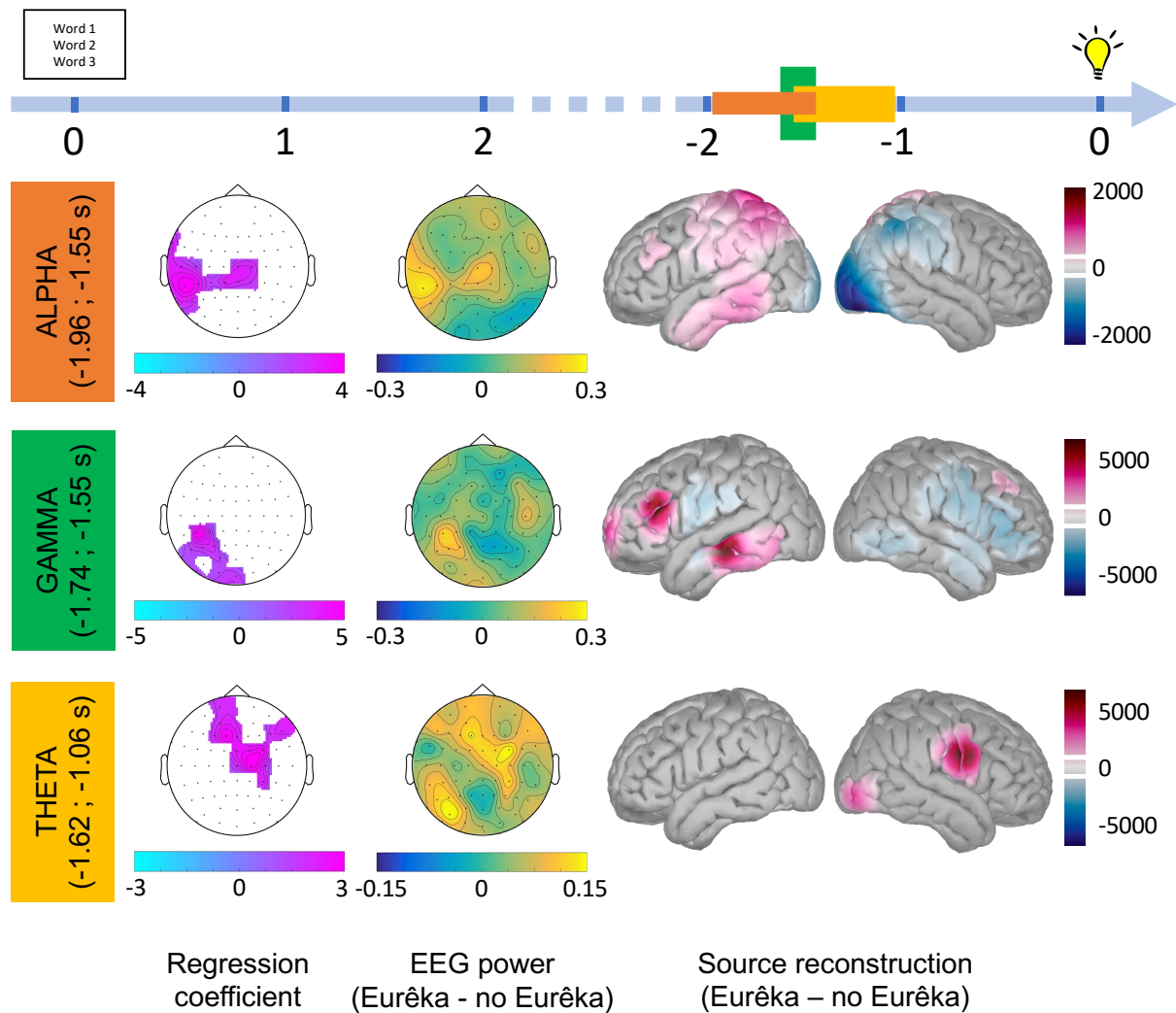


Figure 4. EEG effects related to *insight solving*. **Top:** Time course of EEG activity during the two time windows of interest (initial time window between 0 and 2s after the onset of the cue words, and response time window between -2 and 0s before the response). Colored rectangles symbolize the time period where clusters are significantly associated with Eurêka reports in the alpha band (in orange), the gamma band (in green), and the theta band (in yellow). For each cluster, the results are further detailed as follows. **First column:** Topographical maps of the cluster. The significant clusters ($p_{corr} < 0.05$) are represented for each frequency band. The color codes the regression coefficient values in the significant clusters (color bar from negative values in light blue to positive values in purple). **Second column:** Topographical maps of EEG power in each band contrasted between trials with Eurêka minus those without Eurêka, averaged across subjects and in the time windows of the clusters (as indicated in the colored rectangles on the left). Color bars indicate EEG power (z-score of dB) from negative (in blue, Eurêka < no Eurêka) to positive (in yellow, Eurêka > no Eurêka) values. **Third column:** Source reconstruction of EEG activity in each frequency band during the time periods of the significant cluster. The cortical source maps were contrasted between conditions (Eurêka – no Eurêka), and we represent the difference in source activity, for each frequency, averaged across the time window of the cluster. The color bar indicates the power (in pA.m) from negative (in blue) to positive (in purple) values. The white lines in the color bars indicate the threshold used to visualize the source on the normalized cortical surface rendering.

Discussion

We explored the neurophysiological correlates of two cognitive components of creative problem-solving. We used an adapted version of Mednick's task (Mednick, 1962; Bendetowicz et al., 2017, 2018) to examine the time course of EEG power related to the *insight solving* and, for the first time, the effect of the *remoteness* of the solution to be found in the context of a semantic associative combination. In contrast with most of the previous EEG studies using a similar task that averaged signal across long time-windows or large set of electrodes, or were restricted to specific electrodes or frequency bands (Jung-Beeman et al., 2004; Razumnikova, 2007; Danko et al., 2009; Luft et al., 2018), we employed a data-driven time-frequency approach. We found distinct patterns of activity in several frequency bands associated with *remoteness* and *insight solving*. *Remoteness* was associated with a significant increase in alpha activity in a left temporo-central cluster and beta activity in a right fronto-temporal cluster during the initial phase of the task and a later increase in theta activity in a frontal cluster just before the response. EEG activity changes related to *insight* were observed uniquely in the period just preceding the response. They included an increase in alpha activity in a left temporo-central cluster, followed by a gamma activity increase in a left parietal cluster, and finally an increase in theta band activity in a fronto-central cluster. Overall, these EEG findings provide new insights into the dynamic mechanisms involved in creative problem-solving.

In the following sections, we discuss each result, first, at the sensor level (where robust two-level statistical analyses corrected for multiple comparisons allowed us to identify clusters with specific differences in several frequency bands of EEG activities), then at the source level (the brain areas that showed differences in activity in the frequency bands and time windows of sensor level clusters).

Remoteness in associative combination

The *remoteness* of semantic associations was associated with an increase in activity in the alpha band, about 1.5 seconds after displaying the cue words. Alpha is the most reported EEG correlate in creativity studies using various tasks (Fink et al., 2009; Fink & Benedek, 2014; Fink & Neubauer, 2006; Jauk et al., 2012; Mölle et al., 1996; Shemyakina et al., 2007; Zhou et

al., 2018; Mastria et al., 2021), including the RAT (Jung-Beeman et al., 2004; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Luft et al., 2018). Alpha activity increases with the creative requirements of the task (Fink & Benedek, 2014). It has been interpreted as an active inhibition (Klimesch et al., 2007; Klimesch, 2012) of external, non-relevant stimuli, allowing the increase of internal processing (Cooper et al., 2006; Cona et al., 2020) and internally-oriented attention (Fink & Benedek, 2014; Lustenberger et al., 2015). Klimesch (Klimesch, 2012) postulated that alpha-related inhibition is needed to explore and navigate in semantic memory, which is organized as a network. More precisely, access to remote knowledge may require that closely related, but not relevant memory information, is inhibited. Distant CAT trials likely required extended access to the knowledge stored in semantic memory as participants had to find a remote solution and inhibit close but irrelevant associations. The increase in alpha band activity during the initial time may reflect this process. The source reconstruction suggested that the effect of *remoteness* in the alpha band involved the left (and to a lesser extent to the right) inferior and middle temporal gyrus. Previous studies have identified different temporal regions as key brain areas for semantic processing (Hickok & Poeppel, 2004; Binder et al., 2009; Visser et al., 2012; Ralph et al., 2017) with distinct roles for regions along the rostro-caudal and supero-inferior axes (Ralph et al., 2017). The anterior temporal lobe appears as a transmodal hub in semantic processing in interaction with more posterior temporal areas. The left inferior temporal gyrus plays a role in semantic representation and word meaning (Whitney et al., 2011). The left posterior middle temporal gyrus is involved in a semantic control network (Noonan et al., 2013; Teige et al., 2019; Evans et al., 2020; Vatansever et al., 2021). Semantic control is likely involved in CAT, especially in the distant trials where participants had to retrieve remote associations and combine them. Neuroimaging studies using RAT-like tasks have reported the involvement regions of the semantic control network (Anderson et al., 2009; Gonen-Yaacovi et al., 2013; Jefferies & Wang, 2021). The involvement of semantic control in CAT is also consistent with previous research linking alpha activity with cognitive control (Sadaghiani & Kleinschmidt, 2016). Overall, the initial alpha activity that we found may reflect enhanced controlled access to the knowledge required by distant trials.

The *remoteness* of the associative combination was also associated with an early increase in beta power in the right centro-temporal and temporo-frontal electrodes. This beta activity temporally overlapped with the alpha cluster described above. Variation of beta

activity during creative thinking or problem-solving is not classically reported. A few studies reported an increase in beta activity in frontal and temporal electrodes associated with the RAT (Razumnikova, 2007) or during other creativity tasks (Rosen & Reiner, 2016; Zioga et al., 2020), but its functional role in the context of creativity is not understood. Beta activity is usually associated with motor preparation, but in different regions and time windows than in our study (da Silva, 2009; Weiss & Mueller, 2012). Hence, the observed higher beta activity for more remote combinations may reflect non-motor cognitive processes. Enhancement of beta-band activity has been related to various aspects of language processing (Weiss & Mueller, 2012), such as the maintenance of a mental state during a cognitive task requiring language (Engel & Fries, 2010) or of visual object representation in short-term memory (Tallon-Baudry et al., 1999). The role of beta activity increase in distant CAT-solving is not obvious. One can speculate that when the cue words to be combined are not quickly converging to a solution, the current mental activity (i.e., active exploration of semantic memory related to the alpha activity) should be maintained, increasing beta activity in the distant condition.

Finally, *remoteness* was associated with higher theta activity one second before the subject's response, involving fronto-temporal regions. Theta activity in creative problem-solving has been scarcely reported (Razumnikova, 2007; Sandkühler & Bhattacharya, 2008). The role of theta activity in cognition is debated. Prefrontal theta activity has been associated with several aspects of executive control functions. Cavanagh and colleagues (Cavanagh et al., 2012; Cavanagh & Frank, 2014) proposed that theta rhythm generated by the median PFC region is involved in monitoring novelty, conflict, and surprise. Theta activity increases when information is accumulated (Cavanagh et al., 2012; Cavanagh & Frank, 2014). When controlled processes are engaged during goal-directed behavior, theta band coherence between frontal and other relevant brain regions increases (Zavala et al., 2018). Several studies have also associated theta activity with other controlled processes and functions such as inhibition (Adelhöfer & Beste, 2020), planning (Domic-Siede et al., 2020), prioritizing relevant information in working memory (Riddle et al., 2020), or analytical reasoning (Williams et al., 2019). Importantly, theta activity has been related to memory retrieval and encoding (Düzel et al., 2010) and may reflect integration processes that allow us to build new connections between elements of knowledge in semantic memory (Backus et al., 2016; Nicolás et al.,

2021). Hence, theta band activity associated with distant CAT may reflect controlled retrieval and integration in semantic memory. Consistent with this interpretation, the central contribution of executive and memory processes in creativity is now well established (Cassotti et al., 2016; Beaty et al., 2016; Volle, 2017; Benedek & Jauk, 2018; Benedek & Fink, 2019). Recent studies have demonstrated the important role of the executive control network for creative thinking (Beaty et al., 2016, 2017; Bendetowicz et al., 2018). The executive control network supports several control processes involved in creative thinking such as working memory, inhibition, attentional control, planning, flexibility, and control and selection in memory retrieval. The source reconstruction of our theta-related cluster revealed a set of left regions largely coherent with the executive control network, such as the rostro-lateral PFC, parieto-temporal junction, and temporal regions. The rostro-lateral part of the PFC is a node of the executive control network that has been shown critical for solving CAT in frontal patients, especially in distant trials (Bendetowicz et al., 2018). Additionally, the grey matter volume in this region was also correlated with performance at this task (Bendetowicz et al., 2017). The particular role of the left rostro-lateral PFC in the CAT may be to combine the retrieved associates or integrate the result of the search from each cue word, i.e., in the relational integration of distant items (Aichelburg et al., 2016; Green et al., 2016; Urbanski et al., 2016). Thus, observing theta power increase during the response time window is consistent with previous studies using different methods showing the involvement of the left rostro-lateral PFC and executive control network in creativity. The source reconstruction also located theta activity in the right inferior pre- and post-central gyrus, a result that was shared between *remoteness* and *insight* analyses and is discussed below.

Overall, our results combined with the existing literature suggest that remote associative semantic combination relied on several controlled processes in distinct periods of CAT-solving (**Figure 5**). Hypothetically, in the initial phase of the task, semantic control (supported by alpha activity in the posterior middle temporal gyrus) may enable the exploration of semantic memory in search of remote associates (in relation to alpha activity in infero-temporal regions, including the temporal pole). The semantic search or search space might be reflected in the overlapping beta activity, that is associated with the maintenance of a current mental state or representation. Finally, just before the response, the increased prefrontal theta activity may reflect the involvement of other executive controlled processes,

allowing to integrate and combine the search results from each cue word, evaluate the generated candidate solution, and finally select the most appropriate response.

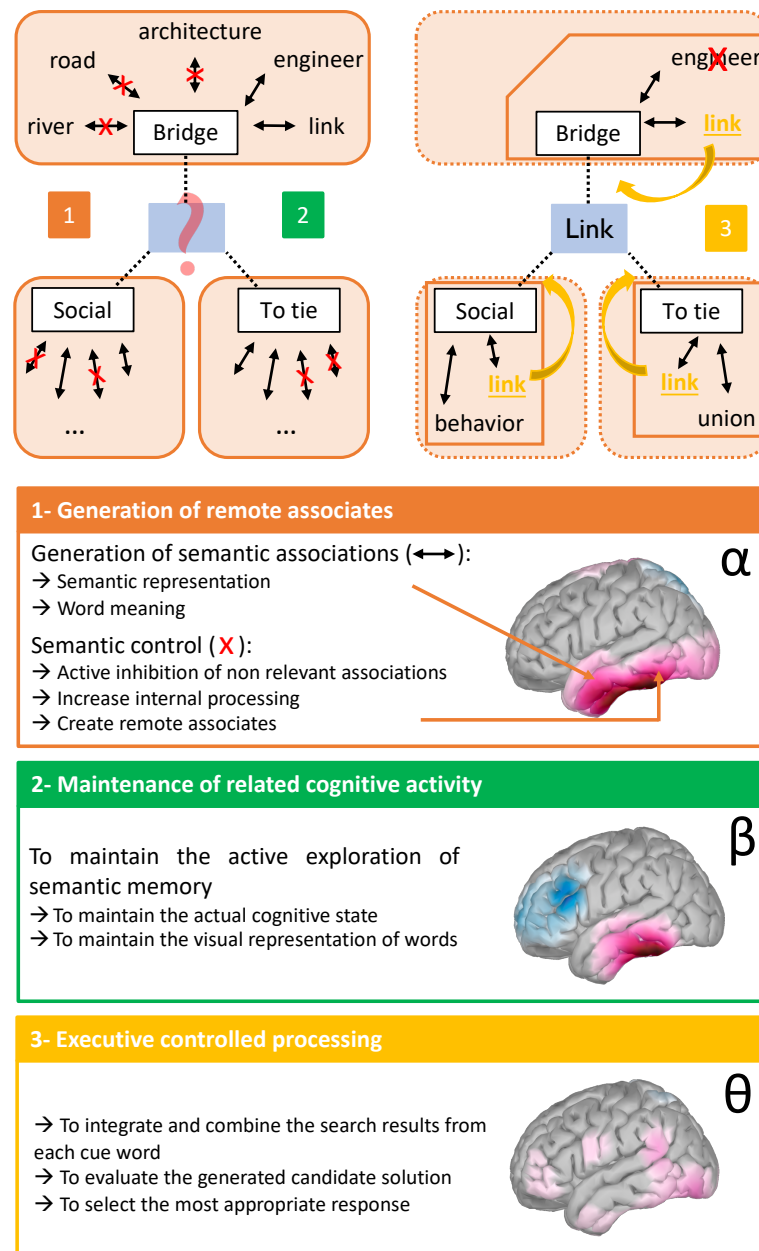


Figure 5. Hypothetical model of remote associative combination. Combined with the existing literature, our results suggest that solving a distant CAT (relative to a close one) requires generating remote semantic associates to each of the three cue words. This is supported by alpha activity in temporal areas (in orange). Overlapping beta activity might facilitate this process by maintaining related cognitive activity (in green). Then, executive controlled processing is needed to integrate, combine, evaluate and select the appropriate response. This final step is supported by theta activity found in brain regions involved in the executive control network.

Insight solving

The second aspect of the CAT that we analyzed, the effect of *insight solving*, was associated with distinct EEG correlates than remote associative combinations. Eurêka-related EEG differences were observed only during the response time window, suggesting that the early stages of problem-solving were similar for trials with or without Eurêka. It might be explained by the fact that the two solving modes (with and without Eurêka) are not exclusive and may co-occur within a trial. It is possible that people initially used analytical thinking until they reach an impasse and finally solved the problem with insight. Cognitive theories link insight with the need to experience a mental impasse and to restructure the problem representation before solving it with insight (Ohlsson, 1992; Sandkühler & Bhattacharya, 2008). It may thus be not surprising that insight and non-insight trials only differ in the period just preceding the response. Nevertheless, we examined only the first and last two seconds of problem-solving. We cannot exclude that differences between trials with Eurêka and without Eurêka occurred in between these time windows.

Just before the response, we observed successive modulation of alpha- and gamma-band activities for trials with Eurêka (compared to those without Eurêka), which is consistent with previous EEG studies (Jung-Beeman et al., 2004; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Sheth et al., 2009; Oh et al., 2020). The source reconstruction suggested that alpha activity related to Eurêka involved the left posterior inferior and middle temporal gyrus and the parietal region. Although the alpha activity associated with the *remoteness* and *insight solving* effects showed some similarities, they occurred at different time periods (initial vs. response time windows), suggesting that they reflected distinct mechanisms. Given the role of alpha in inhibition processes and the involvement of the left inferior and middle temporal gyrus in semantic processing discussed above, the Eurêka-related alpha increase may reflect the inhibition of non-relevant information to overcome the mental impasse and restructure the problem (Sandkühler & Bhattacharya, 2008). The source reconstruction also suggested that the superior parietal lobule, a region often showing alpha activity in relation to creativity (Fink & Benedek, 2014), played a role in *insight solving*. Given the classical role attributed to alpha activity in parietal areas in creativity research, this cluster might alternatively or additionally reflect in increased state of internally oriented attention during trials with *insight solving* (Fink & Benedek, 2014).

Succeeding to alpha, we observed a gamma activity increase in left parietal electrodes, which involved the left anterior superior frontal gyrus, left posterior inferior, and middle frontal gyrus and left middle temporal gyrus. An increase in gamma activity is often reported by studies exploring insight problem-solving (Jung-Beeman et al., 2004; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Sheth et al., 2009; Rosen & Reiner, 2016; Oh et al., 2020) and was related to the suddenness of the solution (Sandkühler & Bhattacharya, 2008). Gamma burst has been associated with the sudden awareness of a mental representation from memory (Tallon-Baudry et al., 1999; Engel et al., 2001; Engel & Singer, 2001). Hence, the gamma activity observed during the CAT-solving with *insight* may reflect the awareness of a solution that popped up suddenly in mind, yielding the subjective Eurêka experience.

The similar alpha followed by gamma synchronization associated with insight reported by previous studies involved distinct electrodes that we observed, especially in the right hemisphere (Jung-Beeman et al., 2004; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Sheth et al., 2009). The reasons for this left-right difference with our results are unclear. They might relate to the use of different paradigms. Previous studies mostly used the compound remote associate task, requiring finding a word that forms a compound word with each cue. Instead, we use a version where the solution is associatively related to the cue words. Thus, our task may rely more on semantic processing than the compound remote associate task, thus recruiting more left-brain areas (Hickok & Poeppel, 2004; Gonzalez Alam et al., 2019). Another methodological difference is that previous EEG studies on insight focused on specific scalp regions or frequency bands based on a priori hypotheses. In contrast, we used a data-driven approach considering all the electrodes and frequencies in our analyses while controlling for multiple comparisons. It potentially revealed new brain correlates of insight problem-solving. In addition, as in other EEG studies based on the RAT (Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Oh et al., 2020), we observed alpha and gamma effects earlier than in Jung Beeman and al study (Jung-Beeman et al., 2004). This difference may relate to the instructions given to our participants of pressing the space bar when they thought the solution they had in mind was correct. It may have encouraged the participants to evaluate their solution more carefully and added a delay between the insight moment and button press.

Finally, as for remote trials, insight trials were associated with higher theta activity in frontal electrodes. This theta activity may reflect conflict monitoring because when the solution arises suddenly in consciousness, a conflict (or surprise) with the ongoing mental representations or ideas can arise, signaling a need for monitoring and selection. The source reconstruction located a potential source in the right inferior part of the pre- and post-central gyri. Although sensorimotor regions in creativity has already been described (Matheson & Kenett, 2020), its role remains challenging to interpret. Interestingly, this region was also a candidate source for the theta activity associated with *remoteness* during the same time window. *Remoteness* in associative combination and *insight solving* are often confused in previous studies (Dietrich & Kanso, 2010), leading to an unclear link between them. According to some theory, they are both resulting in overcoming a mental impasse suggesting that they might share similar thread in the time course of EEG power. In our study, we explored both components with the same task. Overall, our results did not suggest a link between *insight solving* and *remoteness* (no significant interaction at the behavioral level, distinct brain cluster at the sensor level). The shared sources in the theta band frequency cannot be explained by an imbalance in the distribution of trials between the two conditions (for instance, more Eureka reports in distant trials) as the average number of trials included in the EEG analyses did not significantly differ between conditions (see *Supplementary Data*). Even if our source reconstruction is not specific to the cluster found at the sensor level (but rather to a frequency band during a specific time window), we cannot exclude that *remoteness* and *insight* effects shared some similar brain event occurring just before the response. Further study will be needed to clarify this question.

To summarize (**Figure 6**), we show that *insight solving* is associated with successively increased alpha, gamma, and theta power during the last seconds of a CAT-solving. Alpha activity could help to overcome strong but obvious associations of ideas. The solution could hence suddenly emerge in the individual's mental representation, and lead to a gamma activity. Then, a conflict might occur between the Eureka-mediated solution and the previously ongoing mental thinking. This conflict needs to be monitored and controlled, which may be reflected by the increase in theta activity.

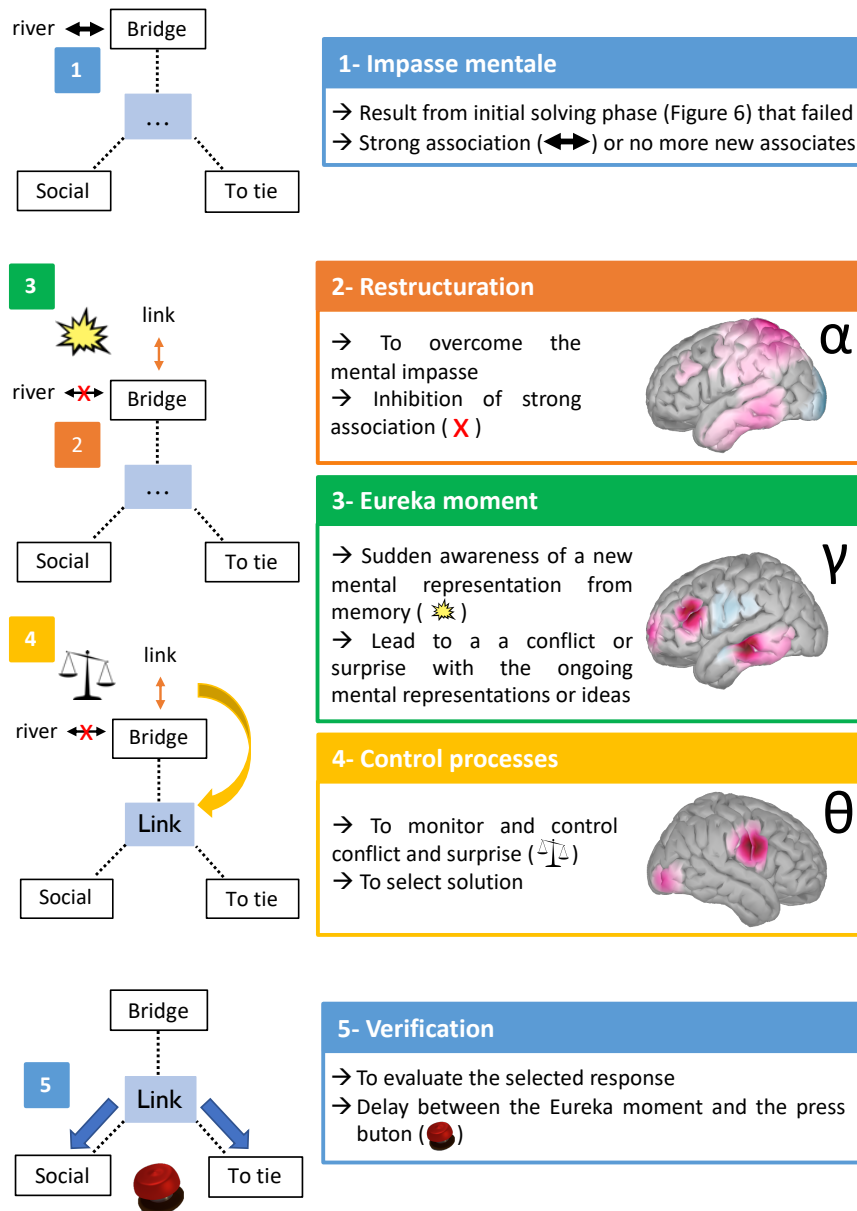


Figure 6. Hypothetical model of *insight solving* related results. After reaching a mental impasse (in blue), restructuring is needed to break out it. Inhibition of strong associations can be supported by alpha activity in temporal areas (in orange). When a new association suddenly arises in consciousness, a realization of the solution occurs (supported by gamma activity, in green). It ensures a conflict or surprise that needs to be monitored to select the appropriate association (supported by theta activity, in yellow), verified before answering (in blue).

Limitations

This study is not without limitations. First, the CAT is a difficult task with a low correct response rate, often around 60%. Added to the constraints related to EEG artefact cleaning, we included in our analyses much fewer trials than expected. We chose not to analyze incorrect trials since the cognitive involvement of the participants in incorrect trials is

uncontrolled. Second, the usually long response time in such a task led us to analyze fixed time windows at the beginning and end of each trial without considering the time in between. We thus do not provide the whole picture of the processes happening during our task. Finally, it may be noted that the individual MRIs of the participants were not available. Thus, source reconstruction results must be interpreted cautiously and entail more uncertainty than the effects we characterized at the sensor level. However, the involved regions are broadly consistent with the neuroimaging literature, and our results offer new perspectives on potential networks involved in creative problem-solving. Finally, we used the most used and validated approach with self-reports of Eureka experience to define *insight solving* (Laukkonen & Tangen, 2018). However, the best method to capture the insight phenomenon that would best reflect specific solving mechanisms is an open question.

Conclusion

This study explored the EEG correlates of two aspects of RAT problem-solving, *remoteness* in associative combination and *insight solving*. We showed distinct patterns of brain activity in the time-frequency domain for these two aspects. First, *semantic remoteness* was associated with an early alpha and beta activity in latero-temporal regions and a theta activity in frontal areas just before the response. These results suggest that early controlled processes may guide and constrain the search of remote associates, whereas later controlled processes may integrate or combine the retrieved information. Second, *insight solving* was associated with alpha then gamma activity in infero-temporal regions and theta activity in frontal areas, which occurred just before the response. These findings indicate that *insight* is supported by specific brain dynamics distributed in space and time that may relate to a sudden restructuration of the problem or its solution. Furthermore, late theta activity might also suggest that solving a problem with *insight* also includes the involvement of control processes, possibly in the facilitation or monitoring of the Eurêka-mediated solution. Further work is needed to overcome approximates of source reconstructions. Combining neuroimaging approaches or recording intracranial EEG signal can be promising methods for future research to better understand brain correlates of creative problem-solving.

Methods

Participants

Twenty-three right-handed native French speakers aged from 21 to 25 years old (mean age=23.04; standard deviation, SD=1.15; 13 women) were included in the study. All participants were healthy adults with MMSE \geq 28 (Folstein et al., 1975), no history of neurological and/or psychiatric illness, no psychoactive substance abuse, nor consumption less than 24 hours before the experiment. Two participants were excluded because of technical problems during the experiment. The analyzed sample thus consisted of 21 healthy adults (mean age=22.95, SD=1.15 years old, 12 women). A national ethical committee approved the study. All the participants gave their written informed consent and received financial compensation.

Experimental task

EEG was recorded during the performance of the CAT (Bendetowicz et al., 2017, 2018), which is an adapted version of the RAT (Mednick, 1962). In such a task, subjects are asked to provide a word that connects three unrelated cue words. Our adapted version varied the semantic strength association (SAS) between the cue words and the expected solution, based on French associative norms (Debrenne, 2011; Bendetowicz et al., 2017, 2018). Briefly, it quantifies the proportion of subject who produced the word B when given the word A in a free word association task. For instance, if 383 of 538 participants responded “cat” when they were presented with the word “dog”, then the SAS was 71 (i.e., $383/538 \times 100$). CAT trials were designed so that the three cue words were not associated with each other in the French associative norms, and varied their associations with the solution word. We selected words from the database which were tested on at least 450 adult native French speakers. We considered the average SAS between the expected solution and each of the three cue words within each trial. Hence, every trial was characterized by a SAS value: the lower the SAS value, the more remote the solution was from the cue words (an example trial with a low SAS value - hence distant solution - is Bridge-Social-To tie, where the solution is Link; an example trial with a high SAS value – hence close solution – is Street-Countryside-Centre, where the solution is Town). Previous studies using the CAT (Bendetowicz et al., 2017, 2018) have shown that the

performance in this task, especially for distant trials, correlated with other creative assessments suggesting its external validity. Following the same principles as in the original CAT, we built 28 additional trials for the current study in order to anticipate the loss of analyzable trials due to EEG experimental constraints and artifacts. In total, each participant performed 100 trials (median SAS value 6.5, range from 0.3 to 38.8).

During the experiment, the participants were seated comfortably in front of a computer screen. Before starting the task, the examiner explained the general design and instructions with written support. Explanations on Eurêka were particularly detailed. It was described as "the subjective experience you can have when you solve a problem, and the solution comes to mind suddenly, it is not the result of cognitive efforts, and you are not able to report the mental steps leading to this solution". It was opposed to analytic solving in which "you have a strategy and the feeling of gradually getting closer to the solution". We clarified that these two solving methods were not incompatible or exclusive and instructed the participants to consider only a few seconds before their response. To ensure the participants understood the instructions correctly, they completed ten practice trials, and the instructions were repeated when needed. After instructions and training, the participants performed 100 trials in random order while EEG was recorded. Breaks were proposed to the participants every 25 trials to limit fatigue.

The CAT was computerized and programmed using the Psychtoolbox (version 3.0.11) running in MATLAB (MATLAB version 9.0 (R2016a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.) (**Figure 1**). For each trial, the three cue words were displayed on the center of the screen, one above the other to limit eye movements as much as possible. The participants were asked to give a unique word related to all three cue words and had up to 30s to respond. They were aware that the response could be a noun, a verb, or an adjective but not a proper noun or a compound word. As soon as they thought they had found the correct answer, they pressed the space button of the keyboard. This made the three words disappear, and the participants had then a fixed time of 2.5s to tell their response verbally. The screen remained blank during this period. The examiner wrote down the participant's response. In addition, as classically performed in previous studies using similar tasks, we collected the self-report "Eurêka" experience on a trial-by-trial basis (Kounios & Beeman, 2014). Thus, after the 2.5s response

period, the question "Eurêka?" was displayed on the screen. The participants had to indicate whether the solution they gave came to their mind with a Eurêka by pressing the keyboard letters "V" (Eurêka) or "N" (no Eurêka) within a time limit of 5s. A central fixation cross was displayed during the intertrial interval followed by a jittered duration (mean=1.5s, range between 1.2s and 1.8s).

Behavioral measures and analyses

Accuracy (correct or incorrect) was determined based on the French associative norm (Debrenne, 2011; Bendetowicz et al., 2017). Responses were also considered valid if they were lexically similar or synonyms to the one defined by the French associative norm. Finally, few additional answers were accepted if they provided semantic similarities with the cue words but were not in the French associative norm. In this case, we asked to five external judges to assess whether the new response was related to all the cue words of the considered trial. If at least two judges evaluated that a relationship existed, the new response was considered as correct. We defined response time (RT) as the time between the onset of the display of the cue words and the space bar press.

Each trial is characterized by a SAS value (a continuous variable determined by the material and fixed between subjects) and can be categorized according to how the subject solved it (with or without Eurêka; binary variable that depends on each subject). To estimate the effect of *remoteness* (SAS) on performance, we computed the percentage of individuals with correct responses (i.e., number of individuals who gave a correct response divided by the total number of participants) and the mean RT for correct responses on a trial-by-trial basis. We explored the relation of accuracy and RT with the corresponding SAS value using Spearman correlations.

We also explored how many trials were solved (or not) with a Eurêka and without a Eurêka. To examine whether trials solved with a Eurêka differed from those without a Eurêka, we compared the averaged percentage of Eurêka and no Eurêka, and the averaged RT of trials with and without Eurêka across individuals. We focused on correct trials as incorrect ones were excluded from the EEG analysis. Statistical comparisons were performed using non-parametric paired Wilcoxon tests.

Finally, we explored the link between the effect of SAS and Eurêka using a two-level modeling approach. First, we ran a Generalized Linear Model (GLM; using the `glmfit` function in MATLAB) at the individual level using only correct trials. Taking advantage of the SAS value of each trial, we used logistic regression to explore whether the SAS predicted a Eurêka. As we expected the SAS to be correlated with RT, we removed the variance explained by RT from the SAS variable. We then computed a logistic regression exploring the relationship between the corrected SAS and Eurêka. Then, for the second-level analysis, we computed a one-sample two-tailed t-test (against zero) on the subject's regression coefficients resulting from the GLM. This allowed us to analyze the relation between Eurêka reports and SAS at the group level.

EEG

EEG recording

EEG data were recorded using BRAINAMP DC system (Brain Products GmbH, Munich, Germany) with 64-active electrodes mounted in an elastic cap (actiCAP) according to the extended International 10–20 system and including a row of low fronto-temporo-occipital electrodes (PO9/10, TP9/10, FP9/10). Two additional electrodes were used as reference (FCz electrode) and ground (AFz electrode). Disposable electrodes placed above and below the right or left eye and lateral to the outer canthus of both eyes recorded vertical and horizontal EOG, respectively. Electrode impedances were at or below ten kOhm. The EEG data were recorded at 1 kHz with an online 0.016-250 Hz bandpass filter.

EEG preprocessing

All EEG preprocessing and analyses were performed using the FieldTrip toolbox (Oostenveld et al., 2011), completed by homemade scripts, and brainstorm (version 09-Sep-2020) (Tadel et al., 2011) running under MATLAB (MATLAB version 9.0 (R2016a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.).

EEG signal was downsampled offline to 128 Hz, and filtered with zero phase, third order high pass, and low pass Butterworth filters (set at 0.5 and 63 Hz, respectively). Independent component analysis (ICA) was used to detect and remove artefacts caused by eye blinks. On average, two independent components (IC) were removed after the visual

inspection of the time series and topographies of the IC. Then, the EEG signal was visually inspected to exclude artifacts related to muscles or movements. Next, noisy channels were interpolated using the averaged signal of adjacent channels. A mean of 7 electrodes ($SD=2.1$) was interpolated across participants. Trials containing more than 10% of bad channels were removed (11 trials per individual on average, $SD=6.5$). Finally, the signal was re-referenced to the average of all electrodes (recovering the FCz channel).

We segmented the EEG signal for each trial in two time windows of interest. First, the "initial time window" corresponded to the 2s period following the onset of the cue word display on the screen. Second, the "response time window" corresponded to the 2s period preceding the space bar press (i.e., the subject's response). We considered only correct trials for EEG data analysis. We excluded the trials with an RT shorter than 4s to avoid overlapping our two time windows (14 trials excluded on average per individual, $SD=9.5$).

Averaged numbers of analyzed trials across individuals are presented in **Table S1**. In addition, supplementary analyses are provided to ensure there was no unbalance between the number of trials analyzed across conditions (i.e., *semantic remoteness* and *insight solving*; see supplementary material).

Time-frequency computation

Time-frequency maps were computed for each electrode, trial, and time window (initial and response) in a frequency range between 3 and 60 Hz. We used a multitaper time-frequency transform (Slepian tapers, lower frequency range: 3-32 Hz, six cycles, and three tapers per window; higher frequency range: 32-60 Hz, fixed time-windows of 240ms, 4-31 tapers per window). This approach allows better control of time and frequency smoothing. It uses a constant number of cycles across frequencies up to 32 Hz (hence a time window with a duration that decreases when frequency increases) and a fixed time window with an increasing number of tapers above 32 Hz in order to obtain more precise power estimates by adaptively increasing smoothing at high frequencies. Hence, the resulting EEG power represents the signal amplitude in a given frequency after its spectral decomposition. Time courses were aligned to the onset of the cue word display for the initial time window (corresponding to time 0 for the initial time window epochs) and the space bar press for the

response time window (corresponding to time 0 for these latter epochs). We performed a z-score baseline correction of time-frequency maps using the time-frequency maps computed from the EEG signal recorded -1.2 s to -0.1 before the onset of the display of the cue words on each trial. Finally, time-frequency maps were averaged along the frequency dimension according to the four frequency bands: theta 3-7 Hz, alpha 8-12 Hz, beta 13-30 Hz, and gamma 31-60 Hz.

Task-based analysis

As for the behavioral analysis, we used a two-level statistical analysis approach at the sensor level. First, we used individual linear regressions to explore the relation between EEG power and behavior. To explore EEG correlates of *semantic remoteness*, we used EEG power as the dependent variable and *SAS* as the independent variable. To explore *insight solving*, EEG power was the dependent variable, and the Eurêka report was the independent variable. These two analyses were performed independently at the individual level for each point in time, in each frequency band (theta, alpha, beta, gamma), and for each time window (initial and response time window). This first level of analysis allowed us to obtain regression coefficients at the individual level. Then, at the second (group) level, the resulting individual regression coefficients were analyzed at the between-subject level with cluster-based permutation tests for each frequency band (theta, alpha, beta, and gamma) and time window of interest (initial and response time window). This procedure allowed us to correct our results for multiple comparisons for the time and space (electrode) dimensions (Maris & Oostenveld, 2007; Maris, 2012) and consisted of the following steps. First, for every (time, electrode) sample, we compared the individual regression coefficients (resulting from the individual level analyses) at the group level using one-sample t-tests. Then, candidate clusters were formed based on statistical and tempo spatial adjacency. The clusters formation considered only the (time, electrode) samples where the one-sample t-tests were significant with a *p-value* lower than 0.0125. We selected this statistical threshold because we computed a cluster-based analysis for each of the four frequency bands of interest ($0.05/4=0.0125$). In addition, the temporospatial cluster extent was defined as at least one neighboring electrode in either time or space based on the template "easycapM1" provided by the Fieldtrip toolbox and matched our electrode cap. Then, we computed the sum of the t-test statistics within each obtained cluster (sum(t)) and kept the maximum of the cluster-level t-test. Finally, we used a Monte

Carlo method for each selected cluster to solve the multiple comparison problem. It randomly permuted trials across the two conditions (one condition against 0) and calculated the maximum of the cluster-level summed t-value (as detailed before). This random partition and test statistic computation were repeated 1000 times to obtain the distribution of this cluster statistics under the null hypothesis while correcting for multiple comparisons. The clusters obtained from the original data were finally considered significant if their p -value (p_{corr}) was lower than 0.05 across the 1000 randomizations. As one-sample t-test is not implemented in Fieldtrip toolbox, we used a two-sample t-test comparing our data (i.e., individual regression coefficient) against 0 (i.e., no relationship between the considered condition and the EEG at the individual level).

Source reconstruction

We explored the brain regions related to the significant clusters observed at the sensor level using source localization. For this, we analyzed the cortical sources in the time windows and the frequency bands in which significant clusters were found. We used the Brainstorm software that is freely available for download online under the General Public License (<http://neuroimage.usc.edu>; (Tadel et al., 2011)).

For each individual, first, a head model was computed using the symmetric boundary element method (BEM) method from OpenMEEG open-source software (Gramfort et al., 2010), based on the template MRI normalized in the Montreal Neurological Institute (MNI) system, available in Brainstorm software (MNI/Colin27), and coregistered with the 65 electrodes considering standard 10-10 electrode coordinates. Next, the noise covariance matrix was computed on the time window of interest of all trials with a baseline corresponding to the time period preceding the onset of the word triplet (-1.2s to -0.1s). Sources were then computed at the trial level using preprocessed EEG signal (that is, 128-Hz, ICA-corrected, average-referenced EEG signal). Next, we applied a weighted minimum norm imaging (wMNE) method with current density map measures computed for 15000 trihedral dipoles – total of 45000 elementary dipoles, equivalent to sources unconstrained in their orientation – distributed over the cortical mantle of the brain model obtained from the standard MNI/Colin 27 brain template. Then, we computed the power within the considered frequency band using a Hilbert transformation at the source level for each cluster identified at the sensor level (i.e.,

in each time window and frequency band of interest). Since we used unconstrained orientations for the sources, we computed the time-frequency decompositions for all 45000 elementary dipoles and summed the power for the three orientations at each source location (or vertex) as recommended. Finally, power was averaged within the time window of the cluster and then averaged across trials separately for each studied experimental condition. This procedure was repeated for each participant, and the obtained cortical current power maps were averaged across participants in each condition. Then, we contrasted the maps between conditions (Distant minus Close conditions or Eurêka minus no Eurêka conditions) according to the considered cluster. We did not run further statistical analysis at the source level to avoid double-dipping. The cortical current power maps were thresholded to visualize only sources with activity higher and lower than 10% of the absolute maximal source.

References

- Aberg, K. C., Doell, K. C., & Schwartz, S. (2016). The “Creative Right Brain” Revisited : Individual Creativity and Associative Priming in the Right Hemisphere Relate to Hemispheric Asymmetries in Reward Brain Function. *Cerebral Cortex*. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw288>
- Adelhöfer, N., & Beste, C. (2020). Pre-trial theta band activity in the ventromedial prefrontal cortex correlates with inhibition-related theta band activity in the right inferior frontal cortex. *NeuroImage*, 117052. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117052>
- Aichelburg, C., Urbanski, M., Thiebaut de Schotten, M., Humbert, F., Levy, R., & Volle, E. (2016). Morphometry of Left Frontal and Temporal Poles Predicts Analogical Reasoning Abilities. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 26(3), 915-932. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu254>
- Anderson, J. R., Anderson, J. F., Ferris, J. L., Fincham, J. M., & Jung, K.-J. (2009). Lateral inferior prefrontal cortex and anterior cingulate cortex are engaged at different stages in the solution of insight problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(26), 10799-10804. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903953106>
- Andrews-Hanna, J. R., Reidler, J. S., Huang, C., & Buckner, R. L. (2010). Evidence for the Default Network’s Role in Spontaneous Cognition. *Journal of Neurophysiology*, 104(1), 322-335. <https://doi.org/10.1152/jn.00830.2009>
- 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. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316(1), 29-52. <https://doi.org/10.1111/nyas.12360>
- Aziz-Zadeh, L., Kaplan, J. T., & Iacoboni, M. (2009). « Aha! » : The neural correlates of verbal insight solutions. *Human Brain Mapping*, 30(3), 908-916. <https://doi.org/10.1002/hbm.20554>
- Backus, A. R., Schoffelen, J.-M., Szebényi, S., Hanslmayr, S., & Doeller, C. F. (2016). Hippocampal-prefrontal theta oscillations support memory integration. *Current Biology*, 26(4), 450-457.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Silvia, P. J., & Schacter, D. L. (2016). Creative Cognition and Brain Network Dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(2), 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.10.004>
- 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>
- Becker, M., & Cabeza, R. (2021). *Assessing creativity independently of language : A normed Language Independent Remote Associate Task (LI-RAT)*.
- Becker, M., Sommer, T., & Kühn, S. (2020). Verbal insight revisited : fMRI evidence for early processing in bilateral insulae for solutions with AHA! experience shortly after trial onset. *Human Brain Mapping*, 41(1), 30-45. <https://doi.org/10.1002/hbm.24785>
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Aichelburg, C., Levy, R., & Volle, E. (2017). Brain morphometry predicts individual creative potential and the ability to combine remote ideas. *Cortex*, 86, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.10.021>
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Garcin, B., Foulon, C., Levy, R., Bréchemier, M.-L., Rosso, C., Thiebaut de Schotten, M., & Volle, E. (2018). Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain*, 141(1), 217-233. <https://doi.org/10.1093/brain/awx294>
- Benedek, M., & Fink, A. (2019). Toward a neurocognitive framework of creative cognition : The role of memory, attention, and cognitive control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.11.002>

- Benedek, M., & Jauk, E. (2018). Spontaneous and Controlled Processes in Creative Cognition. *The Oxford Handbook of Spontaneous Thought*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190464745.013.22>
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where Is the Semantic System? A Critical Review and Meta-Analysis of 120 Functional Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex*, *19*(12), 2767-2796. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp055>
- Bowden, E. M., & Jung-Beeman, M. (2003). Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Inc*, *35*(4), 634-639.
- Bowden, E. M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>
- Cassotti, M., Agogué, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to Adulthood : Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving. *New Directions for Child and Adolescent Development*, *2016*(151), 61-72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in cognitive sciences*, *18*(8), 414-421.
- Cavanagh, J. F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. (2012). Theta lingua franca : A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, *49*(2), 220-238.
- Cona, G., Chiossi, F., Di Tomasso, S., Pellegrino, G., Piccione, F., Bisiacchi, P., & Arcara, G. (2020). Theta and alpha oscillations as signatures of internal and external attention to delayed intentions : A magnetoencephalography (MEG) study. *NeuroImage*, *205*, 116295.
- Cooper, N. R., Burgess, A. P., Croft, R. J., & Gruzelier, J. H. (2006). Investigating evoked and induced electroencephalogram activity in task-related alpha power increases during an internally directed attention task. *Neuroreport*, *17*(2), 205-208.
- Danko, S. G., Shemyakina, N. V., Nagornova, Zh. V., & Starchenko, M. G. (2009). Comparison of the effects of the subjective complexity and verbal creativity on EEG spectral power parameters. *Human Physiology*, *35*(3), 381-383. <https://doi.org/10.1134/S0362119709030153>
- da Silva, F. L. (2009). EEG : Origin and Measurement. In C. Mulert & L. Lemieux (Éds.), *EEG - fMRI* (p. 19-38). Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-87919-0_2
- Debrenne, M. (2011). Le dictionnaire des associations verbales du français et ses applications. *Variétés, variations and formes du français. Palaiseau: Éditions de l'École polytechnique*, 355-366.
- Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 822-848. <https://doi.org/10.1037/a0019749>
- Domic-Siede, M., Irani, M., Valdés, J., Perrone-Bertolotti, M., & Ossandón, T. (2020). Theta Activity from Frontopolar Cortex, mid-Cingulate Cortex and Anterior Cingulate Cortex Shows Different Role in Cognitive Planning Performance. *NeuroImage*, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117557>
- Düzel, E., Penny, W. D., & Burgess, N. (2010). Brain oscillations and memory. *Current opinion in neurobiology*, *20*(2), 143-149.
- Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations—Signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, *20*(2), 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.02.015>
- Engel, A. K., Fries, P., & Singer, W. (2001). Dynamic predictions : Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(10), 704-716.
- Engel, A. K., & Singer, W. (2001). Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness. *Trends in cognitive sciences*, *5*(1), 16-25.

- Evans, M., Krieger-Redwood, K., Gonzalez Alam, T. R., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2020). Controlled semantic summation correlates with intrinsic connectivity between default mode and control networks. *Cortex*, *129*, 356-375. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.04.032>
- Fink, A., & Benedek, M. (2014). EEG alpha power and creative ideation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *44*, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.12.002>
- Fink, A., Grabner, R. H., Benedek, M., Reishofer, G., Hauswirth, V., Fally, M., Neuper, C., Ebner, F., & Neubauer, A. C. (2009). The creative brain : Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 734-748. <https://doi.org/10.1002/hbm.20538>
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2006). EEG alpha oscillations during the performance of verbal creativity tasks : Differential effects of sex and verbal intelligence. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *62*(1), 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.01.001>
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state" : A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of psychiatric research*, *12*(3), 189-198.
- Gonen-Yaacovi, G., de Souza, L. C., Levy, R., Urbanski, M., Josse, G., & Volle, E. (2013). Rostral and caudal prefrontal contribution to creativity : A meta-analysis of functional imaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 465. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00465>
- Gonzalez Alam, T. R. del J., Karapanagiotidis, T., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2019). Degrees of lateralisation in semantic cognition : Evidence from intrinsic connectivity. *NeuroImage*, *202*, 116089. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116089>
- Gramfort, A., Papadopoulos, T., Olivi, E., & Clerc, M. (2010). *An empirical evaluation of free BEM solvers for M/EEG forward modeling*. *Biomag.*
- Green, A. E., Spiegel, K. A., Giangrande, E. J., Weinberger, A. B., Gallagher, N. M., & Turkeltaub, P. E. (2016). Thinking Cap Plus Thinking Zap : TDCS of Frontopolar Cortex Improves Creative Analogical Reasoning and Facilitates Conscious Augmentation of State Creativity in Verb Generation. *Cerebral Cortex*, bhw080. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw080>
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams : A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, *92*(1-2), 67-99.
- Jauk, E., Benedek, M., & Neubauer, A. C. (2012). Tackling creativity at its roots : Evidence for different patterns of EEG alpha activity related to convergent and divergent modes of task processing. *International Journal of Psychophysiology*, *84*(2), 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.02.012>
- Jefferies, E., & Wang, X. (2021). Semantic Cognition : Semantic Memory and Semantic Control. In *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*.
- Jones, L. L., & Estes, Z. (2015). Convergent and divergent thinking in verbal analogy. *Thinking & Reasoning*, *21*(4), 473-500. <https://doi.org/10.1080/13546783.2015.1036120>
- Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., Reber, P. J., & Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biology*, *2*(4), E97. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020097>
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(12), 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations : The inhibition-timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, *53*(1), 63-88. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.06.003>
- Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The cognitive neuroscience of insight. *Annual Review of Psychology*, *65*, 71-93. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>

- Laukkonen, R. E., & Tangen, J. M. (2018). How to detect insight moments in problem solving experiments. *Frontiers in psychology, 9*, 282.
- Lin, J., Cui, X., Dai, X., Chen, Y., & Mo, L. (2018). Neural correlates of creative insight : Amplitude of low-frequency fluctuation of resting-state brain activity predicts creative insight. *PLoS one, 13*(8), e0203071.
- Luft, C. D. B., Zioga, I., Thompson, N. M., Banissy, M. J., & Bhattacharya, J. (2018). Right temporal alpha oscillations as a neural mechanism for inhibiting obvious associations. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(52), E12144-E12152.
- Luo, J., & Niki, K. (2003). Function of hippocampus in “insight” of problem solving. *Hippocampus, 13*(3), 316-323.
- Lustenberger, C., Boyle, M. R., Foulser, A. A., Mellin, J. M., & Fröhlich, F. (2015). Functional role of frontal alpha oscillations in creativity. *Cortex, 67*, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.03.012>
- Maris, E. (2012). Statistical testing in electrophysiological studies : Statistical testing in electrophysiological studies. *Psychophysiology, 49*(4), 549-565. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01320.x>
- Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods, 164*(1), 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.024>
- Mastria, S., Agnoli, S., Zanon, M., Acar, S., Runco, M. A., & Corazza, G. E. (2021). Clustering and switching in divergent thinking : Neurophysiological correlates underlying flexibility during idea generation. *Neuropsychologia, 158*, 107890.
- Matheson, H. E., & Kenett, Y. N. (2020). The role of the motor system in generating creative thoughts. *NeuroImage, 213*, 116697. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116697>
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review, 69*, 220-232.
- Mölle, M., Marshall, L., Lutzenberger, W., Pietrowsky, R., Fehm, H. L., & Born, J. (1996). Enhanced dynamic complexity in the human EEG during creative thinking. *Neuroscience Letters, 208*(1), 61-64.
- Nicolás, B., Sala-Padró, J., Cucurell, D., Santurino, M., Falip, M., & Fuentemilla, L. (2021). Theta rhythm supports hippocampus-dependent integrative encoding in schematic/semantic memory networks. *NeuroImage, 226*, 117558.
- Noonan, K. A., Jefferies, E., Visser, M., & Lambon Ralph, M. A. (2013). Going beyond inferior prefrontal involvement in semantic control : Evidence for the additional contribution of dorsal angular gyrus and posterior middle temporal cortex. *Journal of cognitive neuroscience, 25*(11), 1824-1850.
- Oh, Y., Chesebrough, C., Erickson, B., Zhang, F., & Kounios, J. (2020). An insight-related neural reward signal. *NeuroImage, 214*, 116757.
- Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the psychology of thinking, 1*, 1-44.
- Oltețeanu, A.-M., Schöttner, M., & Schubert, S. (2019). Computationally resurrecting the functional remote associates test using cognitive word associates and principles from a computational solver. *Knowledge-Based Systems, 168*, 1-9.
- Oltețeanu, A.-M., & Zunjani, F. H. (2020). A visual remote associates test and its validation. *Frontiers in psychology, 11*, 26.
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J.-M. (2011). FieldTrip : Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2011*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2011/156869>
- Power, J. D., & Petersen, S. E. (2013). Control-related systems in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology, 23*(2), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.12.009>
- Qiu, J., Li, H., Jou, J., Liu, J., Luo, Y., Feng, T., Wu, Z., & Zhang, Q. (2010). Neural correlates of the “Aha” experiences : Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex, 46*(3), 397-403.

- Ralph, M. A. L., Jefferies, E., Patterson, K., & Rogers, T. T. (2017). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, *18*(1), 42-55.
- Razumnikova, O. M. (2007). Creativity related cortex activity in the remote associates task. *Brain Res Bull*, *73*(1-3), 96-102.
- Riddle, J., Scimeca, J. M., Cellier, D., Dhanani, S., & D'Esposito, M. (2020). Causal evidence for a role of theta and alpha oscillations in the control of working memory. *Current Biology*, *30*(9), 1748-1754.
- Rosen, A., & Reiner, M. (2016). Right frontal gamma and beta band enhancement while solving a spatial puzzle with insight. *International Journal of Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.09.008>
- Sadaghiani, S., & Kleinschmidt, A. (2016). Brain networks and α -oscillations : Structural and functional foundations of cognitive control. *Trends in cognitive sciences*, *20*(11), 805-817.
- Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2008). Deconstructing Insight : EEG Correlates of Insightful Problem Solving. *PLOS ONE*, *3*(1), e1459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001459>
- Shemyakina, N. V., Danko, S. G., Nagornova, Zh. V., Starchenko, M. G., & Bechtereva, N. P. (2007). Changes in the power and coherence spectra of the EEG rhythmic components during solution of a verbal creative task of overcoming a stereotype. *Human Physiology*, *33*(5), 524-530. <https://doi.org/10.1134/S0362119707050027>
- 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. *International Journal of Psychophysiology*, *110*, 81-90.
- Sheth, B. R., Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2009). Posterior Beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(7), 1269-1279. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21069>
- Sprugnoli, G., Rossi, S., Emmendorfer, A., Rossi, A., Liew, S.-L., Tatti, E., di Lorenzo, G., Pascual-Leone, A., & Santarnecchi, E. (2017). Neural correlates of Eureka moment. *Intelligence*, *62*, 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.004>
- Subramaniam, K., Kounios, J., Parrish, T. B., & Jung-Beeman, M. (2009). A brain mechanism for facilitation of insight by positive affect. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(3), 415-432. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21057>
- Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011). Brainstorm : A user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Computational intelligence and neuroscience*, *2011*.
- Tallon-Baudry, C., Kreiter, A., & Bertrand, O. (1999). Sustained and transient oscillatory responses in the gamma and beta bands in a visual short-term memory task in humans. *Visual Neuroscience*, *16*(3), 449-459.
- Teige, C., Cornelissen, P. L., Mollo, G., Gonzalez Alam, T. R. del J., McCarty, K., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2019). Dissociations in semantic cognition : Oscillatory evidence for opposing effects of semantic control and type of semantic relation in anterior and posterior temporal cortex. *Cortex*, *120*, 308-325. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.07.002>
- 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*(8), 3241-3252.
- Topolinski, S., & Reber, R. (2010). Gaining Insight Into the "Aha" Experience. *Current Directions in Psychological Science*, *19*(6), 402-405. <https://doi.org/10.1177/0963721410388803>
- Urbanski, M., Bréchemier, M.-L., Garcin, B., Bendetowicz, D., Thiebaut de Schotten, M., Foulon, C., Rosso, C., Clarençon, F., Dupont, S., Pradat-Diehl, P., Labeyrie, M.-A., Levy, R., & Volle, E. (2016). Reasoning by analogy requires the left frontal pole : Lesion-deficit mapping and clinical implications. *Brain*, *139*(6), 1783-1799. <https://doi.org/10.1093/brain/aww072>

- Vatansver, D., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2021). Varying demands for cognitive control reveals shared neural processes supporting semantic and episodic memory retrieval. *Nature communications*, *12*(1), 1-11.
- Visser, M., Jefferies, E., Embleton, K. V., & Lambon Ralph, M. A. (2012). Both the middle temporal gyrus and the ventral anterior temporal area are crucial for multimodal semantic processing : Distortion-corrected fMRI evidence for a double gradient of information convergence in the temporal lobes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(8), 1766-1778.
- Volle, E. (2017). Associative and controlled cognition in divergent thinking : Theoretical, experimental, neuroimaging evidence, and new directions. In *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity* (Cambridge University Press). Editors: R.E. Jung and O. Vartanian.
- Wallas, G. (1926). *The art of thought*.
- Weisberg, R. W. (2013). On the “Demystification” of Insight : A Critique of Neuroimaging Studies of Insight. *Creativity Research Journal*, *25*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/10400419.2013.752178>
- Weiss, S., & Mueller, H. M. (2012). “Too Many betas do not Spoil the Broth” : The Role of Beta Brain Oscillations in Language Processing. *Frontiers in Psychology*, *3*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00201>
- Whitney, C., Jefferies, E., & Kircher, T. (2011). Heterogeneity of the left temporal lobe in semantic representation and control : Priming multiple versus single meanings of ambiguous words. *Cerebral cortex*, *21*(4), 831-844.
- Williams, C. C., Kappen, M., Hassall, C. D., Wright, B., & Krigolson, O. E. (2019). Thinking theta and alpha : Mechanisms of intuitive and analytical reasoning. *NeuroImage*, *189*, 574-580. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.048>
- Wu, C.-L., Huang, S.-Y., Chen, P.-Z., & Chen, H.-C. (2020). A Systematic Review of Creativity-Related Studies Applying the Remote Associates Test From 2000 to 2019. *Frontiers in Psychology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.573432>
- Yeo, B. T. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., Polimeni, J. R., Fischl, B., Liu, H., & Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, *106*(3), 1125-1165. <https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>
- Zavala, B., Jang, A., Trotta, M., Lungu, C. I., Brown, P., & Zaghoul, K. A. (2018). Cognitive control involves theta power within trials and beta power across trials in the prefrontal-subthalamic network. *Brain*, *141*(12), 3361-3376.
- Zhou, S., Chen, S., Wang, S., Zhao, Q., Zhou, Z., & Lu, C. (2018). Temporal and spatial patterns of neural activity associated with information selection in open-ended creativity. *Neuroscience*, *371*, 268-276.
- Zioga, I., Harrison, P. M. C., Pearce, M. T., Bhattacharya, J., & Di Bernardi Luft, C. (2020). From learning to creativity : Identifying the behavioural and neural correlates of learning to predict human judgements of musical creativity. *NeuroImage*, *206*, 116311. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116311>

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

We thank all the participants to the study. EV and TB are funded by the 'Agence Nationale de la Recherche' [grant numbers ANR-19-CE37-001-01], the 'Fondation pour la recherche medicale' [grant number DEQ20150331725]. The research also received funding from the program 'Investissements d'avenir' ANR-10- IAIHU-06. MOT is funded by Becas-Chile of ANID (CONICYT). TB is funded by 'Société Française de neurologie' and AP-HP. NG and LH are funded by the program "Investissements d'avenir" (Agence Nationale de la Recherche, grant numbers ANR-10-IAIHU-06 and ANR-11-INBS-006) for infrastructure funding. BG received grant number from the 'Fondation pour la recherche médicale' [FDM20150632801].

Authors' contribution

Conceptualization: EV and TB; Methodology: TB, MOT, BG, LH, NG, KL and RL; Data acquirement: TB, MOT and BG; Analyses: TB, ALP, NG and KL; Supervision: EV and NG; Writing: TB, EV and NG.

Data availability

The data sets generated during and/or analyzed during the current study (time frequency matrix per conditions and time window, behavioral data) will be available in a persistent repository with respect to constrains related to ethical committee (anonymized data, no demographical information). EGG analyses used open-access toolboxes that are cited in the manuscript.

Supplementary data

To test if there was a difference between the number of trials analysed between the conditions related to the *remoteness* (high vs. low SAS values) and *insight solving* (with vs. without Eurêka), we performed a 2x2 ANOVA. For this purpose, we categorized trials according to their SAS value into distant trials (with SAS value lower than the overall median SAS value) and close trials (with a SAS value greater than the median SAS value). **Table S1** indicates the average number of analyzed trials in each condition.

In line with the previous results, there was a significant effect of *remoteness* on the distribution of analyzed trials in both time windows (initial time window: $F(1,80) = 5.83, p = 0.02$; response time window: $F(1,80) = 4.65, p = 0.03$), meaning that the number of analyzed trials was greater in the close than the distant condition ($p < 0.05$). There was no significant difference in the number of analyzed trials in the Eurêka and no Eurêka conditions (initial time window: $F(1,80) = 0.60, p = 0.44$; response time window: $F(1,80) = 0.04, p = 0.84$). We did not observe a significant interaction effect between the *semantic remoteness* (close or distant) and the way the subject solved the problem (with or without Eurêka) on the average number of included trials in EEG analyses, for either the initial time window ($F(1,80) = 0.67, p = 0.42$) or the response time window ($F(1,81) = 0.12, p = 0.73$) (**Figure S2**). This indicated that there is no unbalanced distribution of analyzed trials between *semantic remoteness* and *insight solving* conditions.

Supplementary figures

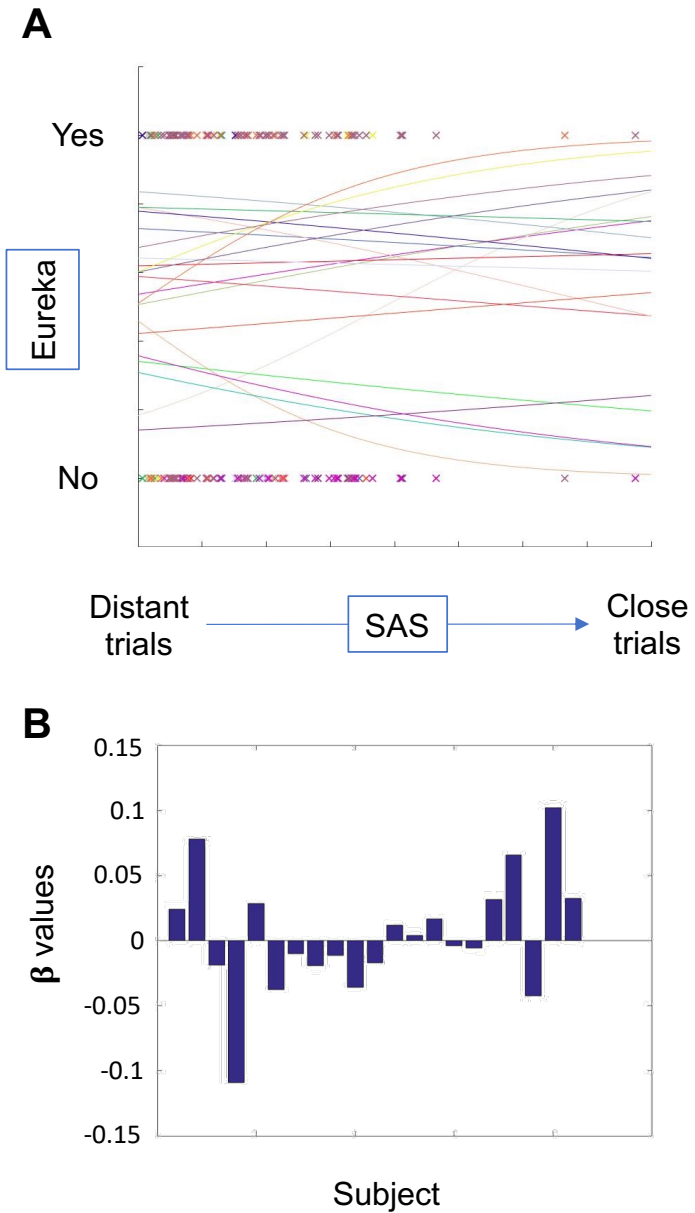


Figure S1. A. Individual logistic regressions exploring SAS as a predictor of the Eurêka report. Each cross represents a trial with its value of SAS (in x-axis) and the report or not of a Eurêka. (binary variable, y-axis). Each colour represents a participant (n=21) with his/her fitting curve based on individual logistic regression. None of these models was significant at the individual level (all $p > 0.05$). **B. Bar plot of regression coefficient values.** Each bar represents a subject (n = 21).

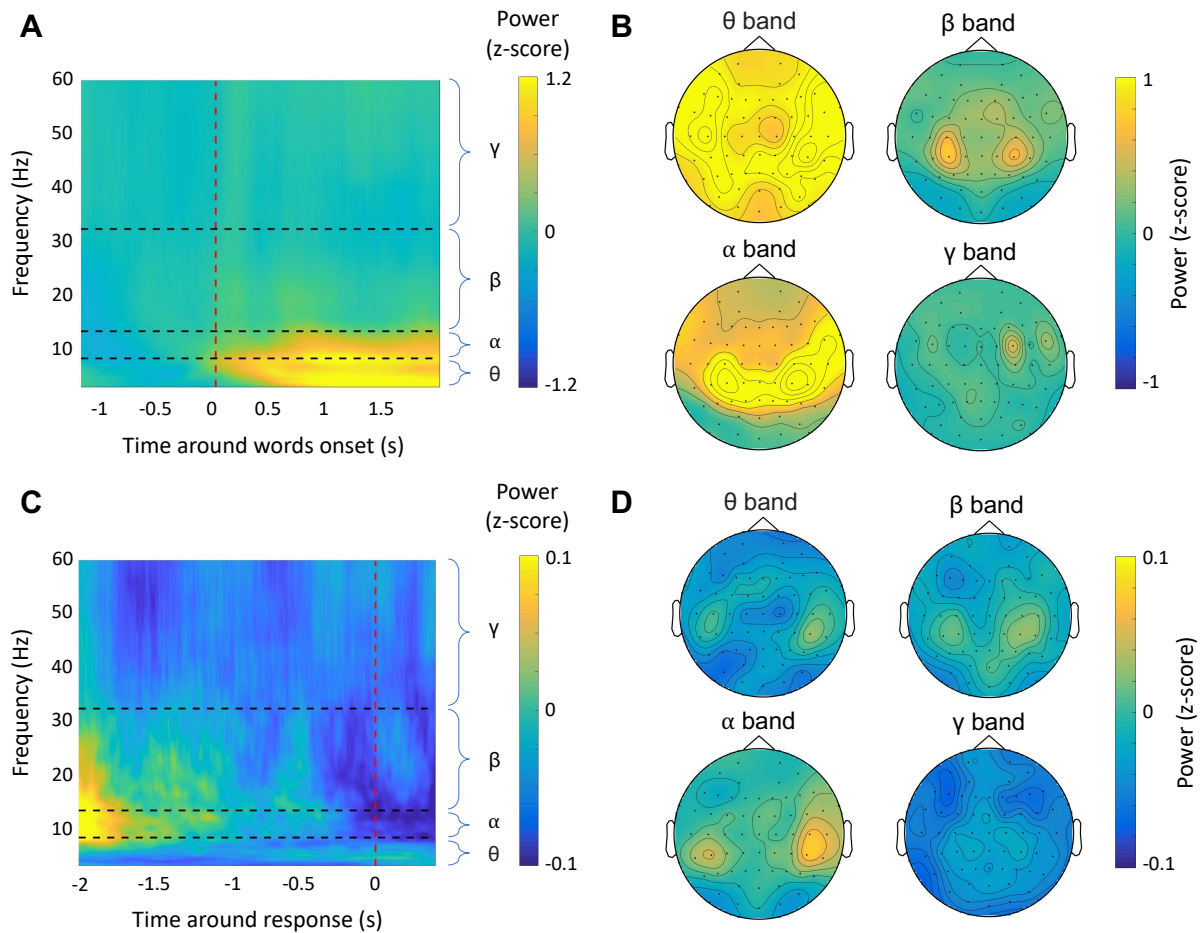


Figure S2. Mean time-frequency maps of EEG activity across all trials. **A.** Time-frequency map across all trials averaged across all electrodes and participants during the initial time window. The time course (x-axis, in seconds) was locked on the onset of the display of the cue words (time 0, vertical dashed red line). The period before time 0 corresponds to the baseline. The color bar represents the power scale (z-score of dB). Frequencies (y-axis, in Hz) were separated into four predefined frequency bands (horizontal dashed black lines): θ (3-7Hz), α (8-12Hz), β (12-30Hz), γ (31-60Hz). **B.** Topographical maps of the theta (θ , top left), alpha (α , bottom left), beta (β , top right) and gamma (γ , bottom right) bands during the initial time window (power in each band was averaged across time, from 0 to 2s). The color bar represents the power scale (z-score of dB). **C.** Same as **A** but for the response time window. The time course was locked on the participants' responses (time 0, vertical dashed red line). **D.** Same as **B** but for the response time window (power in each band was averaged across time, from -2 to 0s).

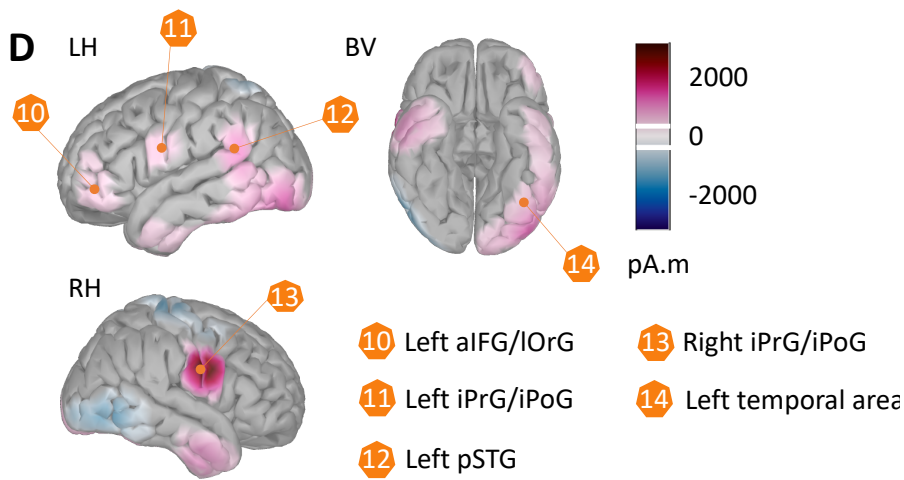
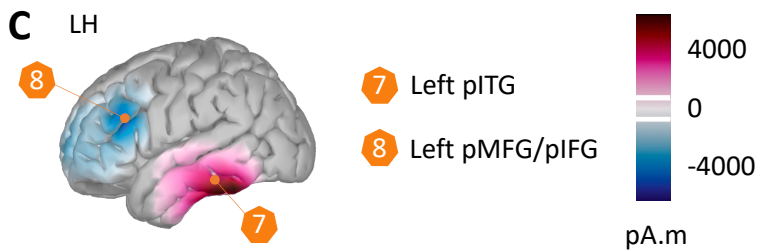
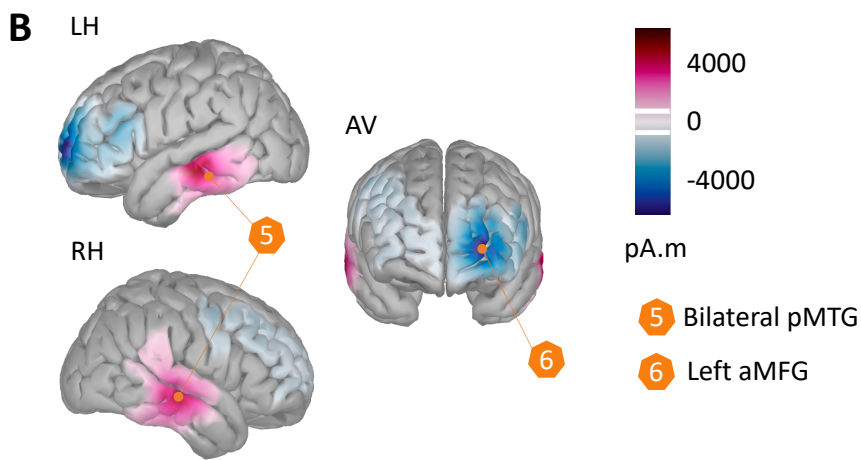
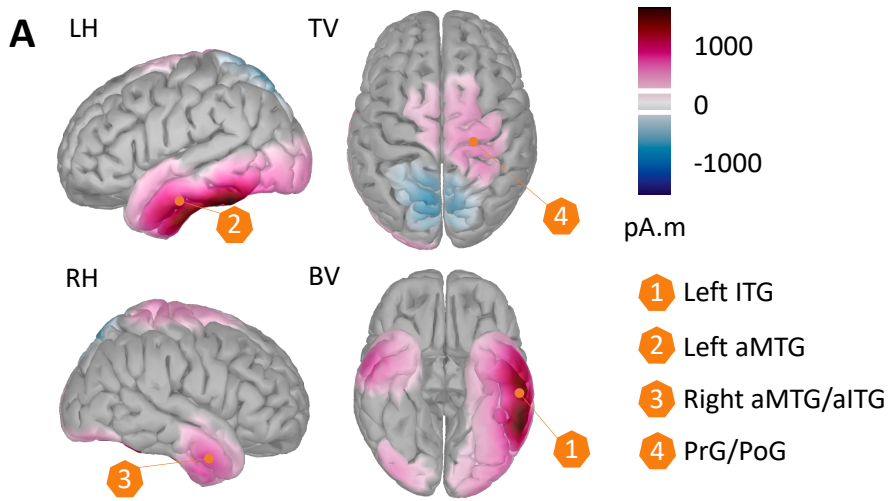


Figure S3. Source reconstruction of the time course of EEG power related to the significant clusters obtained at the sensor level for the effect of the *remoteness* of semantic associations. A. Source reconstruction was computed trial by trial for each individual and averaged across close and distant trials (based on the median value). Sources were then averaged across the alpha cluster's time window and frequency band found at the sensor level and across individuals. The contrast of source reconstruction (distant – close) was represented at the cortical surface of the 3D template MRI normalized in the MNI space. Values of the current density map are indicated with the color bar (in pA.m) from negative value (in blue) to positive value (in purple). The white lines in the color bar indicate the threshold used to visualize the source on the normalized brain rendering. **B.** Same as **A** for the first component of the beta cluster. **C.** Same as **A** for the second component of the beta cluster. **D.** Same as **A** for the theta cluster.

AV – Anterior view, BV – Bottom view, LH – Left hemisphere, RH – Right hemisphere, TV – Top view.

a – Anterior part, i – Inferior part, p – Posterior part.

MFG – Middle frontal gyrus, MTG – Middle temporal gyrus, IFG – Inferior frontal gyrus, ITG – Inferior temporal gyrus, OrG – Orbitofrontal gyrus, PoG – Postcentral gyrus, PrG – Precentral gyrus, STG – Superior temporal gyrus.

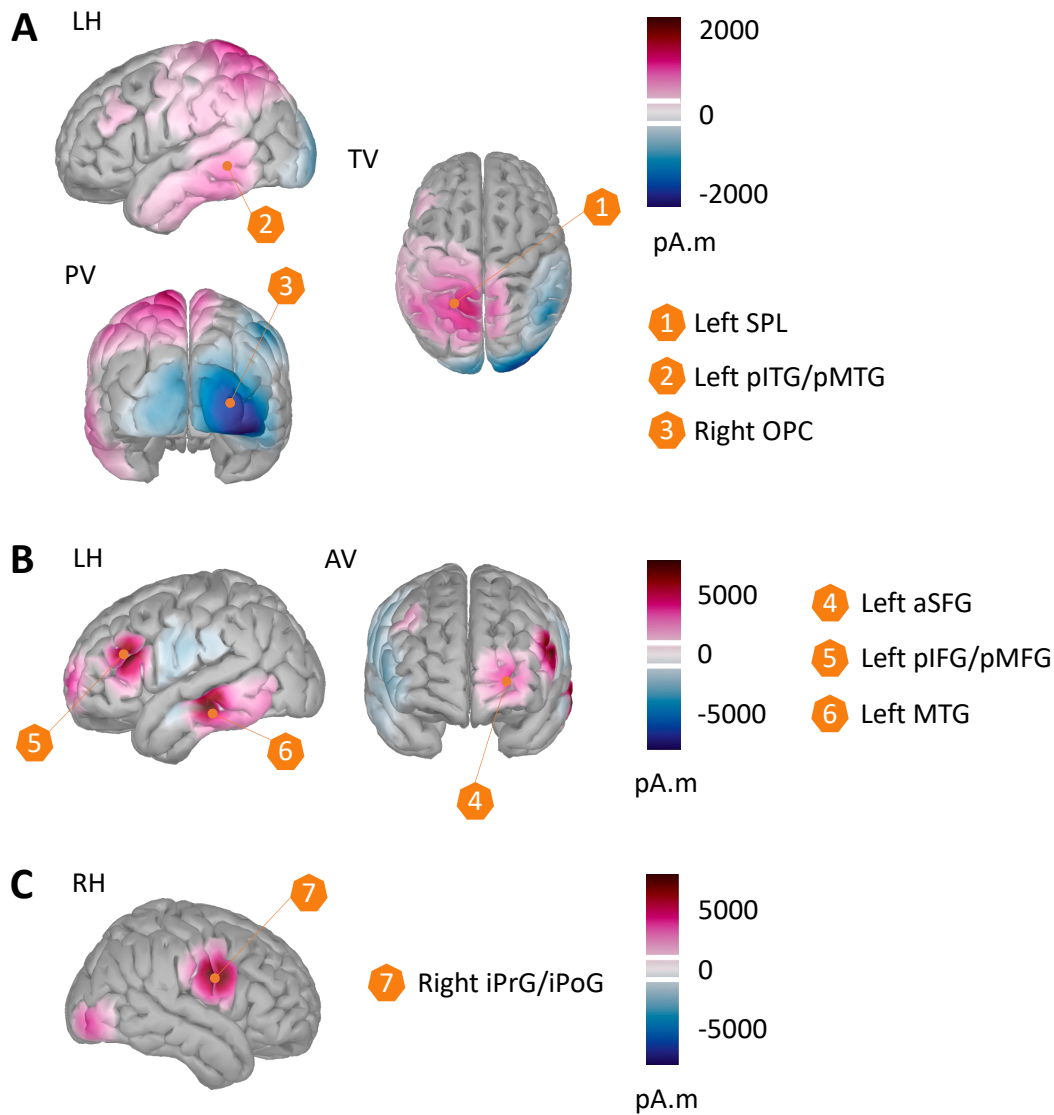


Figure S4. Source reconstruction of the time course of EEG power related to the significant clusters obtained at the sensor level for *insight solving*. **A.** Source reconstruction was computed trial by trial for each individual and averaged across trials with Eurêka and those without Eurêka. Sources were then averaged across the alpha cluster's time window and frequency band found at the sensor level and then across individuals. The contrast of source reconstruction (Eurêka – no Eurêka) is represented at the cortical surface of the 3D template MRI normalized in the MNI space. Values of the current density map are indicated with the color bar (in pA.m) from negative value (in blue) to positive value (in purple). The white lines in the color bars indicate the threshold used to visualize the source on the normalized brain rendering. **B.** Same as **A** for the gamma cluster. **C.** Same as **A** for the theta cluster. AV – Anterior view, LH – Left hemisphere, PV – Posterior view, RH – Right hemisphere, TV – Top view. a – Anterior part, i – Inferior part, p – Posterior part. MFG – Middle frontal gyrus, MTG – Middle temporal gyrus, IFG – Inferior frontal gyrus, ITG – Inferior temporal gyrus, OPC – Occipital polar cortex, PoG – Postcentral gyrus, PrG – Precentral gyrus, SFG – Superior frontal gyrus, SPL – Superior parietal lobule.

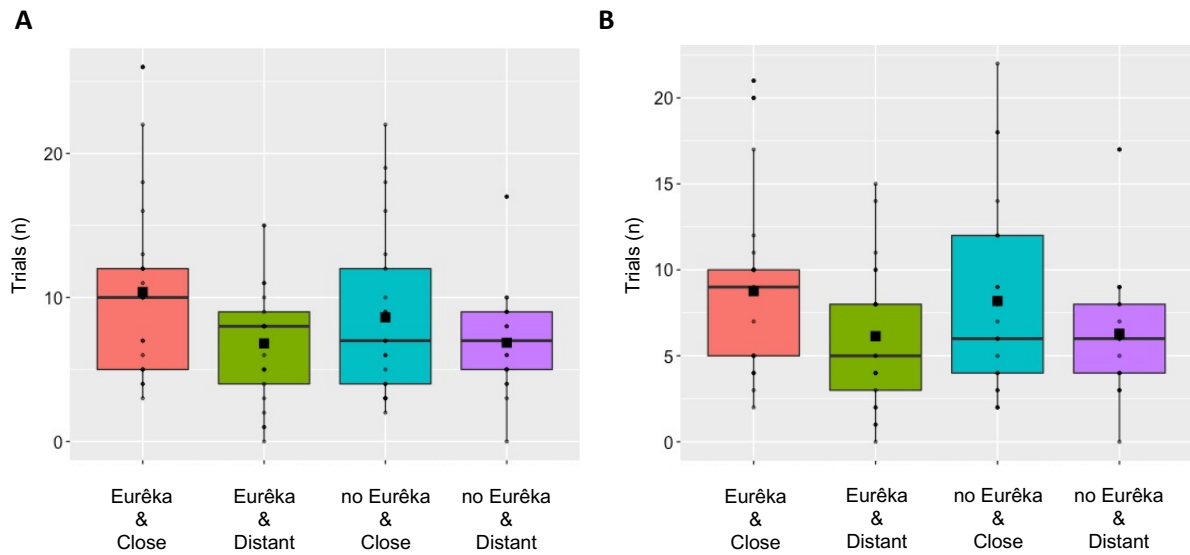


Figure S2. Distribution of the analyzed trials across conditions. Each box plot represents the number of trials included in the EEG analyses for close trials with Eurêka (in red), distant trials with Eurêka (in green), close trials without Eurêka (in blue), and distant trials without Eurêka (in purple). Trials were categorized as close or distant conditions depending on the median value of the SAS. Each point represents a participant. Color boxes represent the upper and lower quartiles. The black horizontal line represents the median value. The black filled square represents the mean of the number of analyzed trials across participants. **A** and **B** are related to the initial time window and the response time window, respectively.

Supplementary table

Time window	Condition			
	Close	Distant	Eurêka	no Eurêka
Initial	18.8 (6.8)	13.3 (5.9)	16.7 (9.3)	15.3 (8.3)
	32.1 (11.5)		32.0 (11.7)	
Response	17.4 (6.7)	12.9 (6.5)	14.9 (8.5)	14.5 (8.2)
	30.3 (12.0)		29.4 (11.0)	

Table S1. Distribution of trials used in EEG analyses. Average number (SD) of correct trials included in EEG analyses for each condition and time window after preprocessing.

Partie 3

Mécanismes modulateurs de la résolution de problèmes créatifs

Dans l'étude 1A, nous avons développé un nouvel outil permettant de capturer les processus de restructuration en rapport avec la représentation d'un problème. Par l'utilisation de cette méthode, nous avons pu établir un lien entre la résolution d'un problème et la restructuration, lorsque celle-ci étaient dirigée vers une représentation pertinente pour la solution. Cet outil s'est montré utile pour montrer le lien entre restructuration et transfert par analogie (étude 1B). Notre nouvelle méthodologie offre de nouvelles perspectives pour étudier les facteurs pouvant moduler la restructuration et la résolution de problèmes. Dans cette étude, nous proposons d'étudier le sommeil (et en particulier le sommeil paradoxal) comme facteur modulateur des processus de restructuration et évaluer son impact sur les capacités de résolution de problèmes.

Le sommeil est un facteur pertinent à étudier dans le contexte de la résolution de problèmes créatifs pour plusieurs raisons. D'abord, nombreuses sont les histoires d'éminents scientifiques ou artistes rapportant comment ils ont eu l'idée de leurs découvertes ou de leurs œuvres à la suite d'une sieste, d'une nuit, ou encore d'un rêve. Ces histoires, vraies ou arrangées, alimentent le mythe du lien entre créativité et sommeil, qui fait l'objet d'un intérêt croissant dans les neurosciences de la créativité et du sommeil¹¹. Le sommeil n'est maintenant plus seulement perçu comme un besoin primaire (de régénération, de repos, de croissance, ...) mais est identifié comme un acteur dans plusieurs fonctions cognitives, notamment mnésiques. Enfin, le sommeil est universel et nous passons un temps considérable à dormir. Ainsi, comprendre les mécanismes par lesquels le sommeil pourrait impacter des capacités

¹¹ En témoigne l'organisation en 2022 d'un symposium inédit lors du congrès annuel de la société des neurosciences de la créativité (SfNC) portant sur la créativité et le sommeil.

aussi critiques pour notre quotidien que la résolution de problèmes pourrait apporter un bénéfice majeur tant sur le plan individuel que sociétal.

Résumé détaillé

Introduction – Plusieurs modèles théoriques ont proposé des hypothèses pour expliquer les mécanismes par lesquels le sommeil pourrait moduler les capacités de résolution de problèmes créatifs (Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). Ils proposent d’associer le sommeil lent à l’extraction de schémas généraux de connaissances (par son implication dans des processus de consolidation mnésique) (Diekelmann et al., 2010; Dudai, 2012; Hoedlmoser et al., 2022; Klinzing et al., 2019; Lewis & Durrant, 2011; Peigneux et al., 2001; Rasch & Born, 2013), et le sommeil paradoxal à la recombinaison de nos associations d’idées en mémoire (par son lien théorique et indirect avec un état d’hyper-associativité) (Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Paller et al., 2021). Cependant les études explorant l’effet du sommeil sur la résolution de problèmes sont rares et hétérogènes. De plus, la question des mécanismes sous-jacent n’est pas adressée directement, et des outils permettant de les explorer font défauts. Nous proposons d’appliquer la méthode des réseaux sémantiques développée dans l’étude 1A pour explorer l’effet du sommeil (et notamment du sommeil paradoxal) dans la réorganisation de nos associations d’idées relatives à un problème (i.e., la restructuration) et son lien avec sa résolution.

Objectif – Évaluer l’impact du sommeil paradoxal dans la réorganisation de nos associations d’idées en rapport avec un problème (reflétant la restructuration) et les capacités à le résoudre (**Figure 26**).

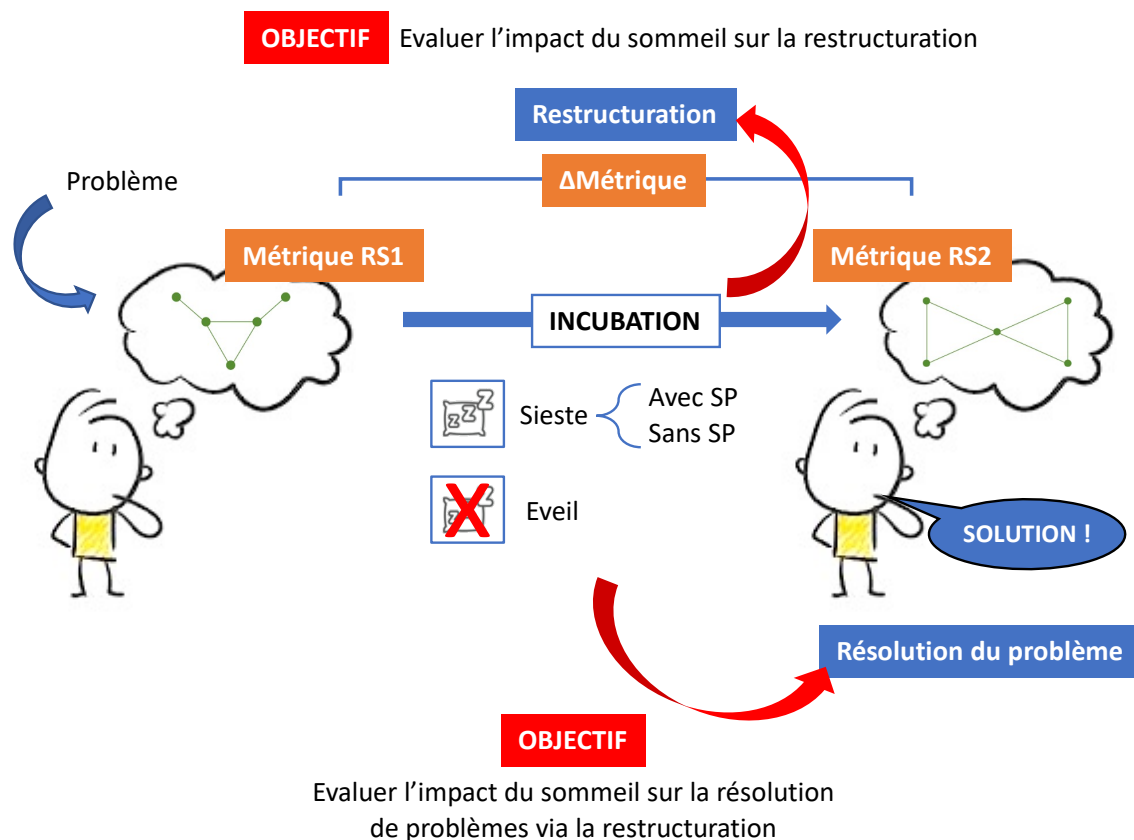


Figure 26. Objectifs de l'étude 3. Évaluer l'impact du sommeil sur la restructuration en utilisant la méthode des réseaux sémantiques et son rôle dans la résolution de problèmes. SP – sommeil paradoxal, RS – réseaux sémantiques.

Méthodes – Nous avons quantifié les processus de restructuration en mesurant les changements qui s'opéraient dans les réseaux sémantiques relatifs à un problème. Les méthodes de construction de ces réseaux étaient similaires à celles de l'étude 1A. Brièvement, les réseaux ont été construits à partir de la RJT (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019), testant la force d'association sémantique entre toutes les combinaisons de paires issues d'une liste de 20 mots en rapport avec le problème. Les réseaux sémantiques étaient donc constitués de 20 nœuds (i.e., les 20 mots de la liste) reliés par des liens représentant la force d'association correspondant aux jugements de la RJT. Les changements d'organisation des réseaux étaient quantifiés par la différence entre les métriques qui caractérisent leurs propriétés de connectivité. Afin d'évaluer l'impact du sommeil sur la restructuration, les réseaux sémantiques ont été construits avant et après une période

d'incubation comprenant un groupe sans sommeil et un groupe avec sommeil (naturellement subdivisé en deux groupes, avec et sans sommeil paradoxal).

Résultats – Le sommeil paradoxal était associé à une restructuration des réseaux sémantiques à plusieurs niveaux. D'abord une restructuration globale (i.e., à l'échelle du réseau complet), indiquant que toutes les associations d'idées devenaient en moyenne plus fortes. Ensuite, une restructuration locale (i.e., concernant une partie spécifique du réseau) ciblant à la fois les nœuds et les liens qui n'étaient pas en rapport avec la représentation dominante du problème et qui étaient évalués comme pertinents pour le résoudre. Nous n'avons pas trouvé de lien significatif entre le sommeil et le taux de résolution de l'énigme. Enfin, les tailles d'échantillons ne nous ont pas permis d'étudier l'effet du sommeil sur la résolution du problème à travers son effet sur la restructuration.

Conclusion – Le sommeil paradoxal facilite la formation d'associations d'idées par un état d'hyper-associativité et une inhibition de la représentation dominante du problème. Cela conduit à l'émergence de représentations alternatives du problème et notamment pertinente pour trouver la solution. Son impact sur les capacités de résolution de problèmes par son effet facilitateur de la restructuration est encore à préciser.

Article

Cette étude a été réalisée en **collaboration** avec le Dr **Yoed Kenett** et la participation de Saoussen Ben Younes (étudiante Master 1) et Marie Succimarra (étudiante Master 2) que j'ai co-encadrées et supervisées. Elle est formalisée par la rédaction de cet article qui sera sujet à des modifications en rapport avec des analyses complémentaires futures.

REM sleep favors the restructuring of problem-related semantic associations

Théophile Bieth^{1,2}, Marie Scuccimarra¹, Yoed N. Kenett³, Marcela Ovando-Tellez¹, Alizée Lopez-Persem¹, Célia Lacaux^{1,4}, Saoussen Ben Younes¹, Arthur Le Coz^{1,4}, Sarah Moreno¹, Isabelle Arnulf^{1,4}, Emmanuelle Volle^{1*} & Delphine Oudiette^{1,4*}

Affiliation:

¹ Sorbonne University, Institut du Cerveau - Paris Brain Institute -ICM-, Inserm, CNRS, AP-HP Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, Paris, France

² Neurology department, Pitié-Salpêtrière hospital, AP-HP, F-75013, Paris, France

³ Faculty of Industrial Engineering and Management, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa 3200003 Israel

⁴ Sleep center, Pitié-Salpêtrière hospital, AP-HP, F-75013, Paris, France

* equal contribution

Key words: Problem-solving, Semantic networks, Restructuring, Cognitive mechanism, Creativity, REM, Sleep, EEG

Abstract

Due to its unique neurochemistry properties, REM sleep is often seen as a hyper associative state that could favor memory restructuring, a key-element in creative problem-solving processes. Yet, the evidence of the role of sleep on problem-solving remains mainly theoretical and experimental studies addressing this issue are scarce. To study the impact of sleep-related memory restructuring on creative problem-solving, we used a network science tool to quantify restructuring based on problem-related semantic networks (SemNet) computed at the individual level. Participants tried to solve a riddle before and after a 90-minute incubation, during which there were assigned either in a sleep group (REM or NREM) or a control group (Wake). After each solving phase, individual SemNet were built based on a relatedness judgment task. These SemNet represented the organization of solution-relevant and irrelevant terms as nodes, and the strength of relationship rated by the participants as edges. The difference in the metrics between pre- and post-incubation SemNets was used to quantify restructuring. We highlighted the positive role of REM sleep in restructuring at different levels: at the global level, facilitating problem-related associations of ideas, and at the local level, modulating the dominant representation of the problem and facilitating solution-relevant associations of ideas. Hence, we provided evidence of the relationship between REM sleep and hyper associativity, supporting previous theoretical models. However, REM sleep did not enhance the solving rate at a behavioral level, suggesting that some additional processes are necessary to boost creative problem-solving.

Introduction

How are great ideas born? Famous inventors, scientists, artists (Barrett, 2001), and regular folks alike (Perdomo et al., 2018) have long reckoned that the genesis of creative sparks may be traced back to our sleeping self. Surprisingly, few researchers have attempted to empirically test this popular assumption.

Most research effort in understanding the impact of sleep on cognition has instead focused on sleep function in memory. Robust experimental and electrophysiological evidence have shown the crucial role of sleep in transforming labile memory traces into stable and enduring ones (Diekelmann & Born, 2010; Dudai, 2012; Hoedlmoser et al., 2022; Klinzing et al., 2019; Paller et al., 2021; Peigneux et al., 2001; Rasch & Born, 2013). This memory consolidation process is thought to preferentially occur in non-rapid eye movement (NREM) sleep and relies on an intricate coupling of neural activity over the neocortex, thalamus, and hippocampus (Born & Wilhelm, 2012; Buzsáki, 1989, 1998; Diekelmann et al., 2010; Klinzing et al., 2019; Rasch & Born, 2007). In addition to directly strengthening/stabilizing individual memories, several authors have hypothesized that sleep also actively transforms memories (Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). For example, the BiOtA model (Lewis et al., 2018) proposed that memory reactivation during NREM sleep favors the formation of schema whereas overlapping reactivations during subsequent rapid eye movement (REM) sleep would recombine memories and promote novel associations (i.e., memory restructuring). Because forming new connections between concepts in memory is at the core of the creative (Mednick, 1962) and problem-solving processes (Bieth et al., 2021; Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994), such sleep-related restructuring mechanism could foster creative problem-solving. This oft-cited hypothesis is found with slight variations in several recent theoretical accounts (Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2014; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021). However, only a handful of studies provided experimental evidence in favor of a link between sleep and memory restructuring in general, and between sleep-related memory restructuring and creative problem-solving in particular.

The idea that sleep transforms memory is partly supported by sleep studies using the Deese, Roediger, McDermott (DRM) false memory paradigm (Deese, 1959; Roediger &

McDermott, 1995). Several of those studies, but not all (Diekelmann et al., 2010; Fenn et al., 2009; Lo et al., 2014), showed that sleep increases false memory of a lure semantically associated with a list of learned items (Darsaud et al., 2010; Diekelmann et al., 2010; McKeon et al., 2012; Pardilla-Delgado & Payne, 2017; Payne et al., 2009), presumably through a spreading activation reinforcing the activation of the lure because of its associations with the learned words (Collins & Loftus, 1975; Howe et al., 2009). In line with this hypothesis, a meta-analysis showed that the effect of sleep on false memory is larger for shorter DRM word lists, that putatively require more associativity to activate the lure than longer word lists (Newbury & Monaghan, 2019). Consistently with this result, two studies showed a beneficial role of sleep (compared to wake) in the formation of relational memory (e.g., the indirect association between two faces that were initially paired with a same, third face during encoding) (Alger & Payne, 2016; Lau et al., 2011).

While all sleep stages may contribute to memory restructuring, REM sleep is often viewed as the most favorable period for this process to occur. Due to its unique neurochemistry properties, REM sleep would be an 'hyper associative' state (Malinowski & Horton, 2021; Stickgold et al., 1999). First, the high level of acetylcholine during REM sleep supports neural plasticity and synapses reshaping (Hasselmo, 1999; Rasmusson, 2000). Second, endogenous activations by the ponto-geniculo-occipital waves (Bizzi & Brooks, 1963; Jouvet et al., 1959) may trigger spreading activations from the occipital cortex to random cortical areas, in turn facilitating novel combinations of memory representations (Lewis et al., 2018). Third, REM sleep presents a broader pattern of inter-regional connectivity than NREM sleep and wakefulness (Chow et al., 2013). Additionally, REM sleep-related mental imagery (i.e., the dreams) may reflect or influence memory reprocessing by combining remote and recent experiences into novel scenarios (Malinowski & Horton, 2021; Wamsley et al., 2010; Wamsley & Stickgold, 2010). Indeed, REM sleep dreams are typically longer (Antrobus, 1983; Casagrande et al., 1990; Foulkes, 1964) more vivid, hallucinatory (Hobson & Stickgold, 1994; Zadra et al., 1998), and metaphorical (Malinowski & Horton, 2021) than NREM sleep dreams. REM sleep dreams also often include bizarre incongruities and discontinuities (Hobson, 1997; Hobson & Stickgold, 1994) that are not random but rather seem to follow associative rules (Rittenhouse et al., 1994). Finally, two experimental studies tested the hypothesis that REM sleep is a hyper associative state by using a semantic priming task after awakenings from

NREM and REM sleep, with the idea that sleep stages' peculiar cognition persists during a short period of carry-over after awakening (Carr & Nielsen, 2015; Stickgold et al., 1999). These studies showed that the effect of semantic priming was different when participants performed the task right after an awakening from REM sleep, from NREM sleep or during wakefulness. After REM sleep awakenings, participants were faster at identifying words weakly associated with the prime word (e.g., thief-wrong) than those strongly associated with the prime (e.g., hot-cold), suggesting that REM sleep does not only favor distant semantic associations but also inhibits obvious ones.

The relationship between sleep or sleep-related memory restructuring and creative problem-solving was only investigated in a few experimental studies and led to disparate findings. These studies used creativity tasks that were supposed to necessitate the formation of novel/distant associations or a change in the representation of the problem (i.e., restructuring) (Bowden et al., 2005). Among them, several studies used the classical Remote Associates Task in which three unrelated words must be combined to find a fourth one (Mednick, 1962). Performance was improved in participants who reached REM sleep, but only if solutions were first primed before sleeping (Cai et al., 2009). Using the same task, other authors found a global positive impact of sleep on creative performance (Carlsson et al., 2019; Sio et al., 2013; Whitehurst et al., 2016; Zander et al., 2017), but did not replicate the involvement of REM sleep in this effect. Other studies, using different insight creativity tasks such as a video-game problem, puzzles, or anagrams, found a positive effect of sleep, either mediated by NREM sleep (Beijamini et al., 2014, 2021) or REM sleep (Walker et al., 2002). Importantly, a few other studies did not find any significant impact of sleep on problem-solving (Brodts et al., 2018; Hołda et al., 2020; Landmann et al., 2016; Schönauer et al., 2018).

Hence, the literature linking sleep, memory restructuring, and creative problem-solving is scarce and inconsistent. These heterogeneous findings might be due to a major methodological problem. All the positive studies mentioned above assumed that successful problem-solving required to restructure the problem representation or memory associations. When participants were better in these tasks after sleep, the authors then inferred that sleep favored creativity via a memory restructuring. This argument is circular as the memory restructuring process itself was never clearly operationalized nor measured. Capturing the

memory restructuring process remains a challenge. Science network methods that provide quantitative tools to represent complex systems such as semantic memory (Hills & Kenett, 2021; Siew et al., 2019) emerge as a promising approach of this process. It allows building semantic network (SemNet) in which nodes represent concepts in memory, more or less associated depending on their semantic similarity (Baronchelli et al., 2013; Benedek et al., 2017; Bernard et al., 2019; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Steyvers & Tenenbaum, 2005). By restricting SemNet to words that are related to a problem, its representation in memory can be approximated. Using network science methodology, we recently demonstrated that it was possible to objectively quantify memory restructuring during problem-solving (Bieth et al., 2021). By computing network-based metrics that reflect connectivity properties of a network (Rubinov & Sporns, 2010), we were able to estimate the organization of ideas' associations (linked to the riddle) in one's semantic memory and quantify its reorganization after solving the riddle at the individual-based SemNet level. We found that problem-solving success was predicted by changes in the SemNets before and after the riddle (i.e., restructuring). Interestingly, these changes were not global but restricted locally in the specific parts of ones' SemNet that had been assessed as helpful to solve the problem by independent raters.

In the present study, we propose to leverage on this novel approach to directly investigate the link between (REM) sleep, memory restructuring and creative problem-solving. Our study was articulated around four main hypotheses. First, we assumed that REM sleep promotes a global restructuring of semantic associations (**Hypothesis 1**). We directly addressed the hypothesis that hyper associative processes occurred during REM sleep by assessing whether REM sleep was related to global changes in problem-related semantic associations toward a more compact and interconnected network. Second, we explored how REM sleep could promote restructuring. We assumed that REM sleep modulates associations of ideas related to the dominant representation of the problem (identified in a previous independent dataset) that may in turn facilitate the generation of alternative representations of the problem (**Hypothesis 2**), and/or that REM sleep may help generating a solution-relevant representation of the problem (i.e., local changes in the specific parts of the network that are useful to find the solution) (**Hypothesis 3**). Finally, we hypothesized that REM sleep-related restructuring would lead to successful problem-solving (**Hypothesis 4**).

Results

One hundred and eleven participants (mean age = 21.6 +/- 2.22 years, 77 women) were administered the same riddle as in our previous study (Bieth et al., 2021). The riddle states: “*Zoe throws a stone that lands in the sky. How is it possible and in which context?*”. To solve this puzzle problem, the initial dominant representation of the problem (based on the usual representation of the sky) needs to be restructured to produce a solution-relevant representation (e.g., the sky is a drawing on the floor). The solution is that Zoe plays hopscotch, a classical backyard children game in which players must throw a stone into parts of a diagram drawn on the ground and then hop on them. In France, the last part is traditionally represented by a half-circle named “sky”.

Participants were asked to solve the riddle in a limited time before and after a 90-min incubation period, during which they were instructed to either nap (Sleep group, n = 83) or stay awake (Wake group, n = 28) while their sleep/wake states were monitored through polysomnography (**Figure 1A**). The sleep group was further divided into two sub-groups, depending on whether participants reached REM sleep (REM group, n = 52) or not (NREM group, n = 31) during the nap.

During the solving phases, they were encouraged to give as many guesses as possible without self-censoring (**Figure 1B**). Using the same task and measures as in our previous study (Bieth et al., 2021), we built individual SemNets before and after the incubation period (right after each solving phase) based on each participant’s relatedness judgments on riddle-specific word pairs (Relatedness Judgment Task, RJT; **Figure 1C**) (Benedek et al., 2017; Bernard et al., 2019; Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022). Those SemNets represent elements of problem-related concepts as nodes linked to each other with edges representing individual RJT ratings.

To quantify the organization of problem-related associations, we calculated established network-based metrics using science network tools (Boccaletti et al., 2006; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Oldham et al., 2019; Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Rubinov & Sporns, 2010; Siew et al., 2019). These metrics represented how much edges were strong (the *weight*, *W*), short (the *shortest path length*,

SPL), or efficient (the *efficiency*, Eff), but also how much nodes were interconnected (the *clustering coefficient*, CC) or influential (the *eigenvector centrality*, EV) (see *Methods*). We measured incubation-related changes in SemNets organization by calculating the difference of each metric between the pre- and post-incubation SemNets (**Figure 1A**, see *Method*). Several participants (n = 46) were excluded (25 because they solved the riddle in the first solving phase, the others for various task-specific reasons; see *Methods*). The final sample included 84 participants in the behavioral analyses and 65 participants in the SemNet analyses (see **Figure S1**).

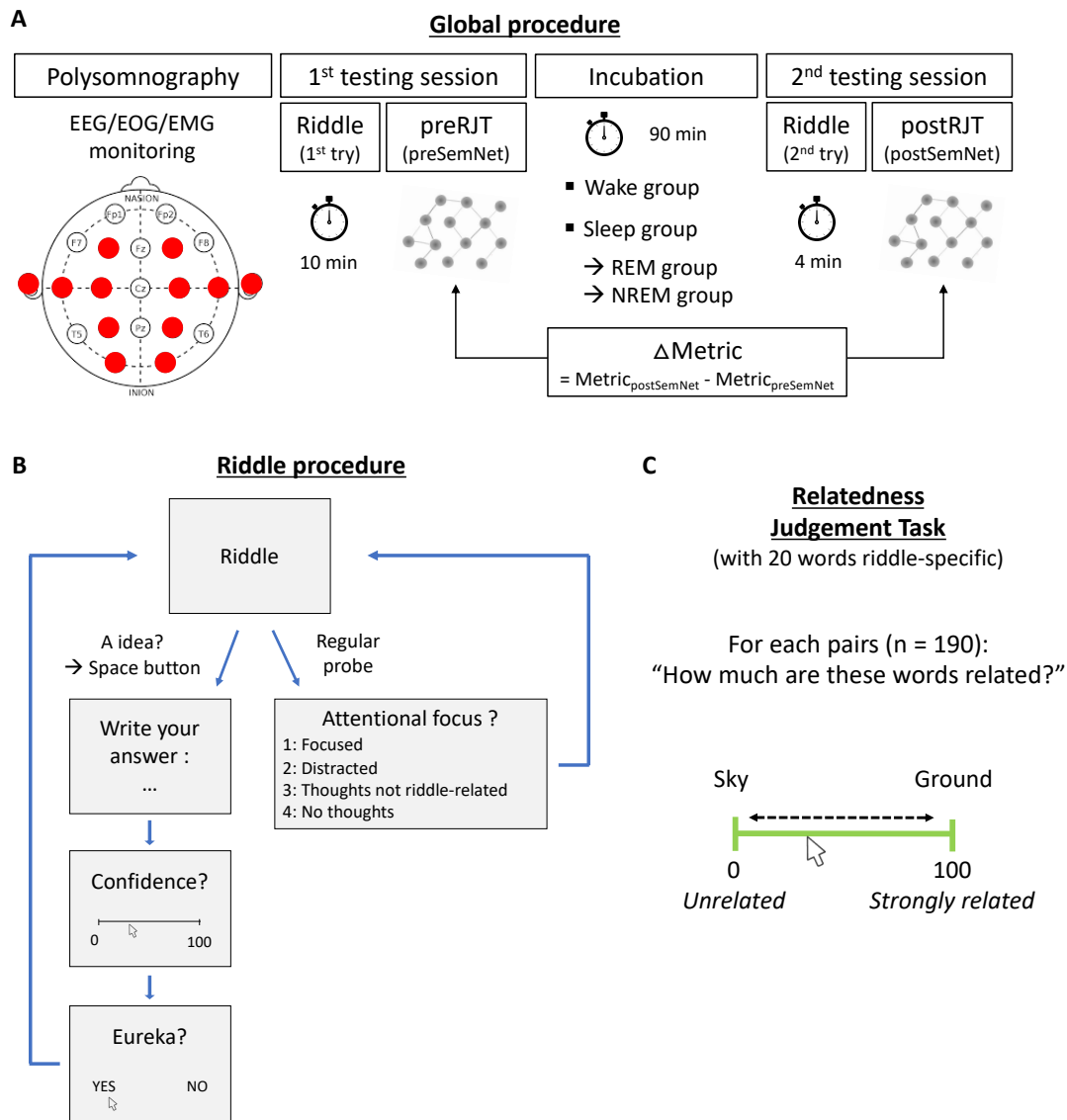


Figure 1. Experimental procedure. A. Global design. Participants were first equipped with EEG, EMG, and EOG sensors to monitor sleep/wake states (polysomnography). EEG layout in the 10-20 system is provided, with red circles indicating the position of electrodes on the scalp. Then participants had a first testing session, during which they had to solve a riddle and complete the first RJT (preRJT). The incubation period corresponded to a 90-min break, in which participants were divided into two groups: a group that stayed awake (Wake group) and a group that took a nap (Sleep group, further divided into NREM and REM groups, depending on whether participants reached REM sleep during the nap). After the incubation period, participants underwent a second testing session, which included a new attempt to solve the riddle and the second RJT (postRJT). Changes in the organization of SemNets were assessed by computing the difference of network-based metrics between the postSemNet and the preSemNet (ΔMetric) **B. Riddle procedure.** Participants had a limited time (10 min in the first testing session and 4 min in the second one) to search for the solution to the riddle. They could propose as many solutions as they wanted. For each answer, they were asked to successively indicate their confidence level and whether this solution came to their mind with a Eureka feeling. Regularly, we probed participants to indicate their attentional focus. **C. Relatedness Judgement Task procedure.** During the RJT, participants had to rate the strength of semantic association between two words on a visual scale from 0 (“unrelated”) to 100 (“strongly related”). Word pairs composing RJT trials were all possible combinations of a pre-established word list consisting of 20 words that can be related or not to the problem or its solution (n = 190).

REM sleep promotes global restructuring of problem-related associations (Hypothesis 1)

We assumed that changes in global network-based metrics can measure an increased associativity. To assess whether REM sleep facilitates semantic associativity between problem-related elements, we first tested whether global restructuring (i.e., averaged Δ Metric across edges/nodes at the individual level) was higher in the REM group ($n = 31$) compared to the NREM ($n = 17$) or Wake groups ($n = 17$). Higher global restructuring values would reflect that ones' SemNet becomes globally more interconnected, compact, efficient, and composed of influential nodes, thus facilitating associativity.

We found a significant main effect of the group on ΔW ($F(2,62) = 3.52, p = .036$), ΔCC ($F(2,62) = 3.26, p = .045$), and ΔEV ($F(2,62) = 4.42, p = .016$), a tendency on ΔSPL ($F(2,62) = 3.08, p = .053$), and no effect on ΔEff ($F(2,62) = 1.867, p = .16$). The post hoc tests revealed that participants in the REM group had a higher ΔW , ΔCC and ΔEV compared to those in the Wake group ($\Delta W: F(1,46) = 6.93, p = .035$; $\Delta CC: F(1,46) = 6.52, p = .042$; $\Delta EV: F(1,46) = 8.57, p = .016$) whereas there were no significant differences between the NREM and Wake groups ($\Delta W: F(1,32) = 2.29, p = .21$; $\Delta CC: F(1,32) = , p = .11$; $\Delta EV: F(1,32) = 2.31, p = .14$), and between NREM and REM groups ($\Delta W: F(1,46) = 1.21, p = .28$; $\Delta CC: F(1,46) = 0.29, p = .59$; $\Delta EV: F(1,46) = 1.61, p = .21$) (**Figure 2**). These results indicate that individual SemNets became more connected (ΔW and ΔCC increase) and composed of more influential nodes (ΔEV increases) after the incubation period (compared to before) for participants who reach REM sleep compared to those who did not sleep.

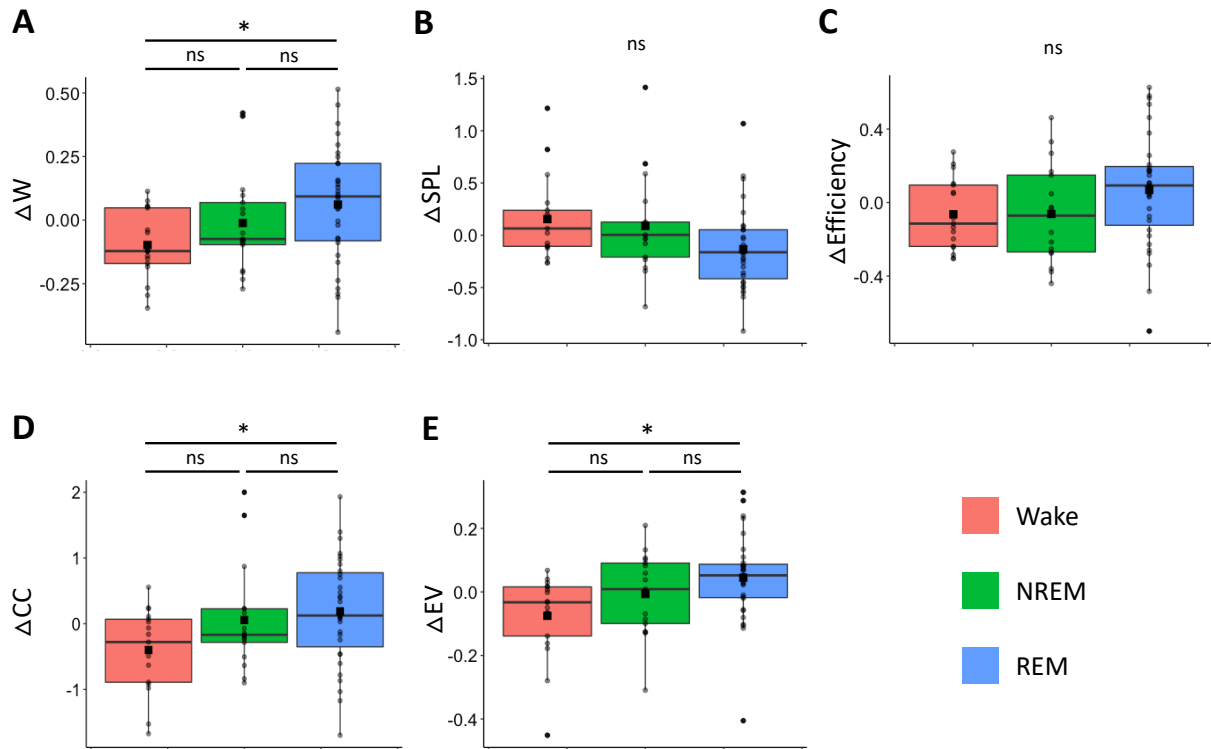


Figure 2. REM sleep is related to higher global (SemNet) restructuring. Averaged values of Δ Metric as a function of the group (Wake in red, NREM in green, and REM in blue) for the *weight* (W , **A**), the *shortest path length* (SPL, **B**), the *efficiency* (**C**), the *clustering coefficient* (CC, **D**), and the *eigenvector centrality* (EV, **E**). Each dot represents a subject, color boxes represent the upper and lower quartiles, black lines and squares indicate respectively the median and the mean. *: $p < .05$, ns: non-significant differences.

REM sleep prevents a dominant but solution-irrelevant problem representation (Hypothesis 2)

Next, we assessed whether REM sleep would reduce the strength of the semantic associations related to the dominant, but solution-irrelevant, problem representation. This dominant representation was determined based on the most common but irrelevant responses to the riddle in an independent dataset (see *Methods* and *Supplementary Data*). We tested whether restructuring (i.e., Δ Metric) differed as a function of the group (REM, NREM, and Wake group) and the type of nodes or edges (related or unrelated to the dominant representation). Here, we were particularly interested in the interaction effect of the two factors, which allowed us to assess whether sleep induced a local restructuring of the nodes or edges that were related or not to the dominant representation.

There was a significant interaction effect on the ΔSPL ($F(2,6367) = 15.17, p = 2.68 \cdot 10^{-7}$) and the ΔEV ($F(2,1232) = 7.13, p = 8.34 \cdot 10^{-4}$), but no effect on ΔW ($F(2,6019) = 2.28, p = .10$), ΔEff ($F(2,6367) = 0.80, p = .45$), and ΔCC ($F(2,1232) = 1.19, p = .20$). All statistical results are detailed in **Table S2**. Post-hoc analyses revealed that the interaction effect was driven by a difference between the REM and the Wake groups for both ΔSPL ($F(1, 4702) = 25.92, p = 1.11 \cdot 10^{-6}$) and ΔEV ($F(1,910) = 13.5, p = 7.56 \cdot 10^{-4}$) and between the REM and the NREM groups for the ΔSPL ($F(1,4702) = 15.30, p = 1.40 \cdot 10^{-4}$) but not (despite a trend) for ΔEV ($F(1,910) = 3.07, p = .08$). Finally, there was no significant difference between NREM and Wake group for both ΔSPL ($F(1,3330) = 1.11, p = .29$) and ΔEV ($F(1,644) = 3.37, p = .08$). These results indicate that nodes related to the dominant representation became less influent (lower ΔEV) than those related to it in the REM group compared to the wake group. In addition, nodes unrelated to the dominant representation become closer (lower ΔSPL) than those related to it in the REM group compared to the NREM and Wake groups. Overall, these findings suggest that REM sleep is associated with an oriented-restructuring of problem-related associations: REM sleep, compared to wake or NREM sleep, specifically decreases the strength of the associations related to the dominant representation of the problem, potentially favoring alternative ones.

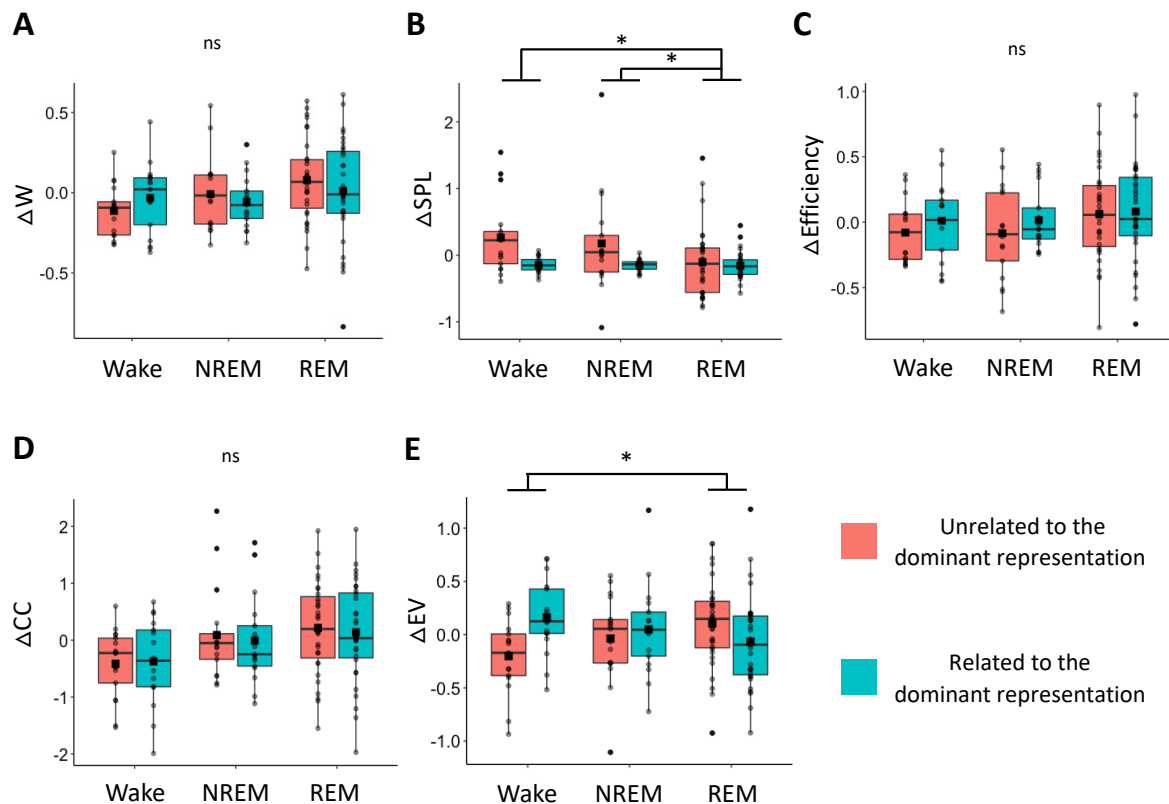


Figure 2. REM sleep favors problem-related alternative associations over obvious ones. Changes in the semantic networks after the incubation period (Δ Metric) as a function of the group (Wake, NREM, and REM) and of the type of nodes/edges (related or unrelated to the dominant representation in blue and red, respectively) for the *weight* (W, **A**), the *shortest path length* (SPL, **B**), the *efficiency* \mathcal{C} , the *clustering coefficient* (CC, **D**), and the *eigenvector centrality* (EV, **E**). Each dot represents a subject, color boxes represent the upper and lower quartiles, and black lines and squares indicate respectively the median and mean. *: $p < .05$, ns: non-significant differences.

REM sleep promotes a solution-relevant representation of the problem (Hypothesis 3)

We tested whether REM sleep facilitated a specific restructuring of the word associations that were the most useful to find the solution. The usefulness of each node or edge to solve the problem was evaluated beforehand by external and independent judges (see *Methods* and Bieth et al., 2021). We could thus compute an average *impact rating* for each node and edge, with higher scores (positive) corresponding to the most helpful nodes/edges and lower scores (negative) to the least helpful or misleading ones. In a previous study, we demonstrated that larger positive changes in local metrics (W, *efficiency*, and EV) in nodes/edges judged as more helpful predicted higher solving success (Bieth et al., 2021). This result validates the use of our impact rating to identify solution-relevant nodes and edges. Here, we explored how Δ Metric differed of the group (REM, NREM, and Wake groups) and impact ratings (continuous variable). We were particularly interested in the interaction between group and impact rating as this effect would reflect a SemNet change toward a solution-relevant representation.

There was a significant group by impact rating interaction on Δ SPL ($F(2,12282) = 22.89$, $p = 1.20 \cdot 10^{-10}$) and Δ EV ($F(2,1232) = 4.08$, $p = .017$), but no effect on Δ W ($F(2,11576) = 0.54$, $p = .59$), the Δ Eff ($F(2,12282) = 0.72$, $p = .49$), and the Δ CC ($F(2,1232) = 0.49$, $p = .61$) (**Figure 3**). All statistical results are detailed in **Table S2**. Post-hoc tests revealed that the effect of the impact rating on the Δ SPL was lower in the REM group than in the NREM group ($F(1,9070) = 15.85$, $p = 1.04 \cdot 10^{-4}$) and the Wake group ($F(1,9070) = 43.16$, $p = 1.60 \cdot 10^{-10}$). In addition, the effect of impact rating on the Δ SPL was lower in the Wake group than in the NREM group ($F(1,6424) = 5.131$, $p = .024$). Concerning Δ EV, the post hoc analyses revealed that the effect of the impact rating on the Δ EV was higher in the REM group compared to the Wake group (REM vs Wake: $F(1,910) = 7.80$, $p = .016$) but there were no significant differences between

REM and NREM group ($F(1,910) = 1.59, p = .22$) and between NREM and Wake group ($F(1,644) = 2.27, p = .20$). These results indicate that (i) solution-relevant edges become more strongly connected (lower Δ SPL) and (ii) solution-relevant nodes become more influent (higher Δ EV) in the REM group compared to the Wake group.

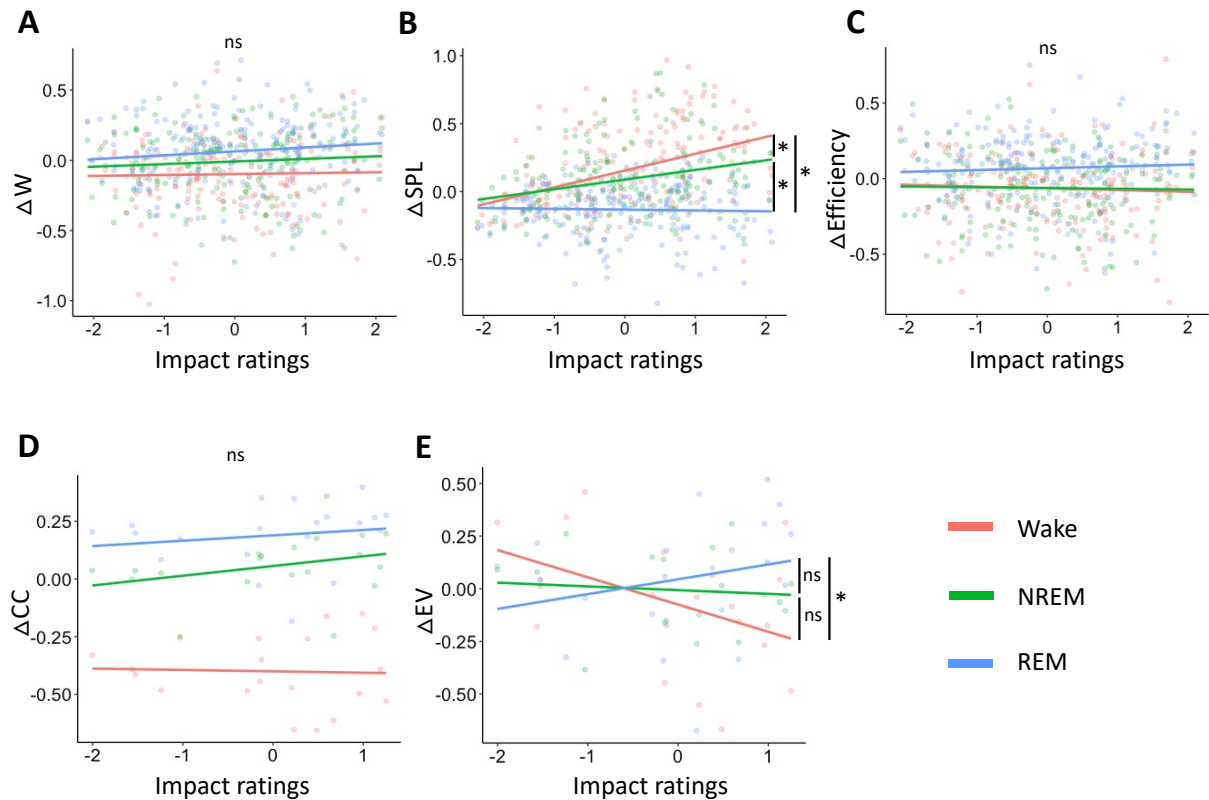


Figure 3. REM sleep favors a local, solution-oriented restructuring of problem-related associations. Changes in SemNet metrics before and after the incubation period (averaged values of Δ Metric) as a function of the group (Wake in red, NREM in green, and REM in blue) and the importance of the nodes/edges (impact rating) for the *weight* (W, **A**), the *shortest path length* (SPL, **B**), the *efficiency* (C), the *clustering coefficient* (CC, **D**), and the *eigenvector centrality* (EV, **E**). *: $p < .05$, ns: non-significant differences.

Does REM-sleep related restructuring lead to successful problem-solving? (Hypothesis 4)

During the first solving phase (i.e., before the incubation period), the overall solving rate of the riddle was 22.5% ($n = 25/111$ solvers, 13 with Eureka). Only ten additional participants found the solution after the incubation period (11.9% of the 84 remaining participants included in the analyses; see **Figure S1**). We found no significant effect of the group on the percentage of participants who solved the riddle after the incubation period

(Wake: 20%, $n = 4/20$ solvers, 2 with Eureka; NREM: 5%, $n = 1/20$ solver with a Eureka; REM: 11.4%, $n = 5/44$ solvers, 4 with Eureka; Fisher test, $p = .36$).

Even if the incubation period did not impact the solving success *per se*, we wondered whether it nevertheless helped participants to become one step closer to the solution compared to the first solving attempt pre-incubation. To do so, we first categorized participants' responses in both solving phases as either close (e.g., the sky is a drawing) or far from the solution (e.g., there is no gravity where Zoe is; see *Method*). Then, we considered that a participant was 'getting closer' to the solution if he/she switched from far responses in the first solving phase to close responses (including the correct solution) in the second solving phase. While the proportion of participants who got closer to the solution tended to be higher in the REM group, it did not reach the significant threshold (Wake: 20%, $n = 4/20$ solvers; NREM: 5%, $n = 1/20$ solvers; REM: 29.5%, $n = 13/44$ solvers; Fisher test, $p = .085$).

Because of the low overall solving rate, we could not directly test our hypothesis 4 that REM-sleep related restructuring was associated with successful problem-solving. Instead, we tested whether we could replicate our previous result (Bieth et al., 2021) demonstrating that solution-oriented local restructuring benefits problem-solving. To this aim, we tested whether the Δ Metric by impact rating interaction (indexing solution-oriented local restructuring, see Hypothesis 3) predicted whether participants (all groups confounded) would get closer to the solution (GettingClose, binary variable). We used the GettingClose variable instead of the solving success to increase statistical power. We found a significant Δ Metric by impact rating interaction on getting closer to the solution for the *efficiency* ($\beta = 0.07$, $p = .01$), and the EV ($\beta = 0.23$, $p = 1.32 \cdot 10^{-3}$) but not for the Weight ($\beta = 0.04$, $p = .18$), the SPL ($\beta = -0.03$, $p = .45$), and the CC ($\beta = 0.18$, $p = .36$). All statistical results are detailed in **Table S4**. These results indicate that solution-relevant edges and nodes (higher impact rating) become more strongly connected (higher Δ Eff) and influential (higher Δ EV) in participants who get closer to the solution, independently of the sleep effect.

Discussion

Using network science tools assessing changes in individual SemNets organization, we explored whether/how sleep contributed to reorganize our associations of ideas related to a problem (i.e., restructuring) and how this process was related to solving success. We found that REM sleep in particular yields a restructuring of semantic associations, both at the global and local level. First, REM sleep facilitated a global strengthening of problem-related semantic associations. Second, REM sleep specifically weakened the importance of edges/nodes associated with a dominant, but solution-irrelevant problem representation, potentially promoting alternative ones. Supporting this idea, we also found that REM sleep specifically reinforced nodes and edges that were the most helpful for finding the solution. While our study provided strong evidence that REM sleep qualitatively and qualitatively transformed our memories by restructuring semantic associations related to a problem, this process did not seem sufficient to promote its successful solving as there was no group difference in the proportion of solvers after the incubation period.

Our main findings that REM sleep promotes memory restructuring is in line with several theoretical accounts (Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2016; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021) and empirical studies suggesting that REM sleep facilitates the combination of remote associations of ideas (Cai et al., 2009; Lacaux et al., 2019) or enhances the link between weakly associated memories (Carr & Nielsen, 2015; Stickgold et al., 1999). In those studies, REM-sleep related restructuring was suggested as a potential mechanism explaining performance in cognitive tasks but was not operationalized as a measurable variable. Our study goes a step further by directly quantifying, how problem-related associations are restructured after sleep using science network tools. With this unique methodology, we could not only show that SemNets are globally different after REM sleep compared to wakefulness, but also precisely identify which parts of the SemNets were specifically modified (i.e., weakening the dominant representation of the problem and boosting solution-relevant associations). Hence, our study provided direct evidence supporting the oft-cited theory that REM sleep triggers associative changes in individuals' semantic space.

We originally expected that REM sleep would enhance problem solving abilities through a restructuring of problem-related associations. This hypothesis could not be fully tested as REM sleep did not promote solving success in our study. This null effect of REM sleep on problem-solving success is at odds with previous studies showing that this sleep stage increases creative performance (Cai et al., 2009; Walker et al., 2002). However, this REM sleep-related boost in creativity has not been consistently replicated (Carlsson et al., 2019; Landmann et al., 2016; Whitehurst et al., 2016). In all those studies (positive or negative), memory restructuring was solely inferred based on the measure of creative performance. By disentangling restructuring from the creative performance itself, our approach might be useful to reconcile discrepancies in the literature. We found that REM sleep reorganizes problem-related SemNets by reinforcing solution-relevant associations of ideas. However, using this newly restructured SemNet to solve the problem may involve other processes that occur during subsequent wakefulness (e.g., efficient navigation within the restructured SemNet). It suggests that restructuring processes might be necessary but not sufficient in problem-solving. This hypothesis is supported by several studies showing that sleep inspires insight of a hidden rule, not immediately after sleep, but after a repeated exposure to the task (Lacaux et al., 2021; Wagner et al., 2004). In this case, increasing the thinking time of the second solving phase or repeating more than one time the RJT after the incubation might increase the chance for participants to extract the solution from their SemNets.

Other, non-mutually exclusive, hypotheses could explain why REM sleep did not enhance solving success in our study. First, the riddle might have been too difficult (22.5% and 11.9% of solver in the first and second solving phase, respectively). This idea is consistent with previous studies showing no benefit of sleep for difficult problems including magic tricks (Schönauer et al., 2018) or an ambiguous crime riddle (Hořda et al., 2020). Second, studies showing a beneficial impact of sleep on creative problem-solving often have in common that the solution was included within the material presented before sleep, whether as a hidden regularity (Lacaux et al., 2021; Wagner et al., 2004) or as a response in a seemingly irrelevant task (Cai et al., 2009). In our case, the RJT implicitly provided participants with solution-relevant associations of ideas (but not the solution itself) before sleeping. Furthermore, this solution-relevant associations may not have been salient enough due to their low proportion related to the total number of word pairs in the task. In line with this idea, participants almost

never found the solution during or right after the RJT (less than 0.5% of participants in our experience with this material). Third, the REM sleep-related restructuring effect may not be sufficient to induce successful problem-solving. It could require exceeding a threshold in restructuring to make restructured solution-relevant associations salient enough. Finally, we cannot exclude that REM sleep restructuring needs to be followed by NREM sleep to yield a creative benefit. Several theoretical models have emphasized the complementary role of REM and NREM sleep in memory (Deperrois et al., 2022; Giuditta, 2014; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018). One might propose that REM sleep allows the formation of alternative representations of the problem by restructuring semantic associations, which may in turn be strengthened by NREM sleep. Our experimental design could be extended to a full night of sleep (instead of a 90-min daytime nap) to test this hypothesis.

Because REM sleep has a late onset latency, we could not study the effect of ‘pure’ REM sleep independently of other sleep stages. Thus, we cannot exclude that some of our REM-related effect might not be specific (e.g., they might be due to a combination of REM and NREM sleep). Few studies highlighted NREM sleep as a state favorable to problem-solving (Beijamini et al., 2014, 2021; Sanders et al., 2019). In our study, restructuring and problem-solving were mainly not different between NREM and Wake group. Of note, the only participant from the NREM group who found the solution in the second solving phase constantly alternated between wakefulness and N1 sleep, without reaching deeper sleep. We recently showed that a micro-nap containing only N1 sleep (and wake) tripled the proportion of participants gaining insight of a hidden regularity in a number task (Lacaux et al., 2021). As N1 sleep shares striking similarities with REM sleep on a physiological and phenomenological level (Nielsen, 2000), it would be interesting to specifically test how this peculiar transition stage influences SemNets organization.

Similarly, to our previous study (Bieth et al., 2021), we additionally found that solution-oriented restructuring was significantly associated with getting closer to the solution, independently of the sleep/wake group. This result replicated our previous findings in another context, including a longer time separating the two SemNets and using a non-naive SemNet at the baseline. It reinforces the mechanistic role of restructuring in creative problem-solving.

We acknowledge that our study has some limitations. First, the low solving rate of the riddle prevented us from testing all announced hypotheses. However, using an easier riddle might not be ideal either as it increases the risk to have too many solvers before the incubation (and thus no changes between Pre- and Post- incubation to investigate). A higher sample size might be recommended in further studies. Second, we used different metrics to assess sleep-related restructuring effects and not all of them were statistically significant. It is not entirely clear why some SemNet metrics reached significance and others did not. More work should directly explore if and how distinct SemNet metrics capture specific aspects of cognitive information processing. Otherwise, these differences might be related to variations in statistical power.

Conclusion

To summarize, we provided evidence of the relationship between REM sleep and hyper associativity by directly examining changes in problem-related SemNets. Our findings support previous theoretical models that highlighted the link of REM sleep with memory recombination. While REM sleep-related restructuring was oriented towards nodes and edges that were helpful to find the solution (and drift away from dominant, irrelevant ideas), REM sleep did not enhance the solving rate at a behavioral level, suggesting that some additional processes are necessary to boost creative problem-solving. Importantly, our study confirmed that evaluating individual SemNets changes is a promising new tool to explore external factor that could impact restructuring processes and creativity.

Methods

Participants

One hundred and eleven native French speakers aged between 18 and 34 years old (mean age = 21.6 +/- 2.22 years, 77 women) participated to this study. All participants were healthy adults with no history of neurological and/or psychiatric illness and no psychoactive substance abuse. In addition, they did not have any sleep disorder or environment that could impact their sleep schedules (working at night, for instance). An approved ethics committee

approved the study (CPP Ile-de-France III). All participants gave their written informed consent and received 50€ as a financial compensation for the experiment.

Several participants were excluded for various task-specific reasons that are detailed in the dedicated methodological section. The final sample included 84 participants in the behavioral analyses and 65 participants in the SemNet analyses (see **Figure S1**).

Experimental procedure and material

Participants underwent a 4h-experiment during which they attempted to solve a riddle two times, separated by an incubation period of 90 minutes (**Figure 1A**). The whole experiment took place in a dedicated room at the sleep center of the Pitié-Salpêtrière hospital. During the incubation period, participants were asked to either have a 90-min nap (Sleep group, $n = 83$, 75%) or to stay awake (Wake group, $n = 28$, 25%). In the Sleep group, participants were lying on a bed in a quiet room with the light off. They were instructed not to resist sleep. Conversely, in the Wake group, participants did not sleep at all and served as a control group. To keep them awake, they were instructed to complete a jigsaw puzzle (a game in which you need to combine pieces to obtain a picture). All participants' sleep/wake states were continuously monitored using standard polysomnography, which includes a monitoring of brain activity (EEG), chin muscle tone (EMG), and eye movements (EOG). Thus, we could confirm whether participants in the Wake group remained awake (two participants were excluded because they slept during the incubation period, Wake group: $n = 26$; **Figure S1**). In addition, based on their sleep stages during the nap, the Sleep group was naturally divided into two groups: the NREM group ($n = 31$) that included participants who only had NREM sleep during the nap, and the REM group ($n = 52$), which included those who also reached REM sleep. To increase the chance that participants will reach REM sleep during the 90-min nap, we asked all participants (even those in the Wake group) to reduce their usual sleeping time by 30% the night before the experiment (without sleeping less than 5 hours in total) and to come early in the morning (7:00 am) when REM sleep pressure is higher. Before the incubation period, participants were presented with the riddle and attempted to solve it in 10 minutes. Then, participants performed a Relatedness Judgment Task (RJT) that allows us to build individual SemNets. Participants were then informed on their assignment to a sleep

or a wake group but were not informed that they will undergo another session of solving and RJT after incubation. The same procedure (riddle then RJT) was applied after the incubation period (but with a shorter solving). All tasks were programmed using the Psychopy software (Peirce et al., 2019), running on a dedicated computer. Task-related instructions were initially explained and repeated before the beginning of each task. Before and after performing the tasks previously described, participants performed additional, independent tasks that are out of the scope of this study.

Problem-solving phase

Participants were asked to solve the same riddle during two different testing sessions in a limited time (10 and 4 minutes for the first and second testing session, respectively). The riddle, which has been used in a previous study (Bieth et al., 2021), states: *“Zoe throws a stone that lands in the sky. How is it possible and in which context?”*. The solution is that Zoe plays hopscotch, a well-known children game in which players must throw a stone into spaces drawn on the ground and then hop on them. The last winning space is traditionally represented by a half-circle named “sky” in France.

During the allotted time, the riddle remained displayed centrally on the screen (**Figure 1B**). Participants were instructed to report all the ideas that came to their mind, even if they judged them bizarre or irrelevant. They pressed the space button to express their response. Pressing the space bar stopped the timer. Participants then had up to 30 seconds to write their response using the keyboard. The number of ideas that a participant could propose was not limited, and no feedback on the response accuracy was provided. For each response they gave, we asked them to assess the confidence they had in this response on a visual scale from 0 (“not sure at all”) to 100 (“completely sure”). Then, we asked whether this response came to mind with a Eureka feeling by pressing “yes” or “no” button (Laukkonen & Tangen, 2018). The Eureka feeling was described during the instruction as “the subjective experience you may have when you solve a problem, and the solution comes to mind suddenly, is not the direct result of a cognitive effort, and you are not able to report the mental steps leading to this solution”. It was opposed to analytic solving where “you have a strategy and the feeling of gradually getting closer to the solution”. In addition, we explained that these two solving methods were not exclusive and instructed participants to only consider the few seconds

before the idea came to their mind. The riddle was displayed again once the participants replied to the Eureka question, and the timer restarted. We regularly probed (one every 2 min in the first session, one every minute in the second session) participants to report their attentional focus. They answered the probes by choosing between four options (“Focused on the riddle”, “Distracted by the environment”, “Thoughts unrelated to the riddle”, “no thoughts”).

In the first solving phase, all participants were included in the analyses ($n = 111$, no participants were already familiar with the riddle). In the second solving phase, we did not consider participants who already found the solution to the riddle during the first solving phase ($n = 25$), and 84 participants remained included in the second solving phase analyses (Wake: $n = 20$; NREM: $n = 20$; REM: $n = 44$) (**Figure S1**).

Relatedness Judgment Task (RJT)

During the experiment, participants performed the RJT before and after the incubation period. Participants were presented with all possible combinations of word pairs using a pre-established word list. This word list was composed of 20 words that were related to the problem or the solution or were neutral. This material was developed and validated in a previous study (Bieth et al., 2021) and is available in **Table S3**. On each trial, one of the 190 potential word pairs was displayed on the screen above a visual scale (**Figure 1C**). Participants were asked to rate the strength of semantic association between the two words on a visual scale from 0 (“unrelated”) to 100 (“strongly related”), located below the two words. Participants had up to 4.5 seconds to respond using the computer mouse and validate their rating with a left-click. The order of trials was initially pseudo-randomized and then fixed across subjects and testing sessions. We used the Mix software (van Casteren & Davis, 2006) to generate a pseudo-random order where each word appeared equally on the right and left sides of the screen and did not repeat in two consecutive trials. Before starting the task, the participants were instructed to answer as quickly and spontaneously as possible and completed 25 practice trials. Before the first RJT, all the words that composed the pairs ($n = 20$) were successively displayed on the screen. After each RJT, we asked the participants whether they thought of a new response to the riddle during the relatedness judgment task.

In addition to remove participants who solved the riddle in the first solving phase ($n = 25$), we excluded 19 additional participants for several reasons related to the RJT (**Figure S1**). First, participants who found the solution after the second RJT ($n = 3$) were excluded. We chose to exclude them because we do not know if the solution came to their mind while performing the RJT (which could influence the following ratings). Second, we excluded participants who did not respond or rated word pairs as zero in more than 15% of all trials in at least one RJT ($n = 15$). We considered that these participants were not sufficiently engaged in the RJT and that missing or zero ratings would importantly bias the network. Finally, one additional participant was excluded because of technical issues during the RJT. The final sample used in SemNet analyses included 65 participants (wake: $n = 17$; NREM: $n = 17$; REM: $n = 31$).

Neurophysiological recording

Polysomnography

Participants were monitored with a video-polysomnography during the whole experiment. The EEG montage included 10 electrodes on the scalp (F1, F2, C1, C2, P1, P2, O1, O2, T7, and T8, in the 10-20 EEG layout), two electrodes positioned above the right superior canthus and the left inferior canthus to record eye movements (EOG1/EOG2), and one electrode placed on the chin to measure muscle tone (EMG) (Compumedics Ltd, Victoria, Australia). Electrode impedances were below five kOhm. EEG signal was referenced to the contralateral mastoid (A1 or A2) and sampled at 250 Hz.

Sleep scoring

According to the American Academy of Sleep Medicine criteria, a 0.3-35 Hz filter was applied for EEG and EOG channels and a 10-100 Hz filter was applied for the EMG channel. For each participant, one experienced scorer (DO) allocated a sleep stage (Wake, N1, N2, N3, or REM sleep) to each 30-second epoch of the incubation period according to the standard sleep scoring guidelines from the American Academy of Sleep Medicine (Berry et al., 2020). The sleep scorer was blind to the participant's performance (RJT scoring and solving success).

Behavioral processing and analyses of the solving phase

Categorization of participants' responses

Procedure

Two independent judges (TB and MS), blind to the participant's group (sleep/wake, solver/non-solver), qualitatively rated the various solutions they proposed, classifying each solution in a generic category. The list of categories was first established by each judge independently after contemplating all the answers to the riddle given by all participants recruited in the current study and a previous one (Bieth et al., 2021). In total, 1235 answers from 160 participants were analyzed using the following procedure. First, the two judges defined a common list of 21 categories that appeared relevant to classify all the responses proposed by the participants. For example, the category "Gravity" includes responses related to the space (e.g., "Zoe is on the moon") or the category "Strength" includes responses implying that the stone is thrown with a lot of strength so that it can land in the sky (e.g., "Zoe has superhuman strength") (see **Table S1** that summarizes all the categories).

Once the list of categories established, the two judges independently classified each of the 1235 responses generated by the participants into a category. A response could belong to several categories if the subject used several concepts. For example, "Zoe throws the stone so far that it got in orbit" can be labeled as "Strength" because Zoe uses strength to throw the stone, but also as "Gravity" because being in orbit refers to gravity laws. After this first step, 92.6% of the responses had at least one category in common between the two judges' rating (92.1% in the initial sample and 92.8% in the present sample). When the between-judges classification for a given response was discordant, the response was scored again independently by each judge. The remaining discordances between judges ($n = 71$, 5.5% with 5.7% in the initial sample and 5.4% in the present one) were discussed individually and a consensus was reached for all but 14 of them (1%, with 0.03% in the initial sample and 1.3% in the present sample). For these non-consensual responses, we applied a rule: only the common category between the two judges was kept, or when the two judges had no category in common, all categories from both judges were kept.

This categorization allowed us to define two additional variables in the current study: one capturing how participants' representation of the problem was close to the dominant representation of the problem specified by the other sample, and the other one capturing whether participants were getting closer to the solution (*isGettingClose*).

Dominant representation of the problem

We defined the dominant representation of the problem based on a previous independent sample of participants ($n = 35$, 213 answers) who failed to solve the same riddle (Bieth et al., 2021). In this study, individual SemNets were computed before and after the presentation of the problem using the same procedure and material as in the current study (but without an incubation period, and with only one solving phase). As a reflect of the dominant representation of the problem, we estimated the most frequent irrelevant responses. We computed for each of the 21 category of responses (see above) the proportion of participants who gave a least one response in this category. For each category, we also computed the individual proportion of responses falling within this category related to the total number of responses given. Then, we computed the *dominance score*, which represents the average value of this latter proportion at the group level (the higher the dominance score, the higher a category is repeated during the solving phase).

To define the dominant representation of the problem, we determined the most common responses in an independent sample of 35 participants who failed to solve the same riddle (see *Method*) (Bieth et al., 2021). In this sample, the most frequent proposed solutions were based on the concept of gravity (gravity category, 86% of participants), the idea that the stone was held by something in the sky (transportation category, 54%) or that Zoe was flying (flight category, 49%; see **Figure S2**). We defined nodes that were related ($n = 7$) and unrelated ($n = 13$) to the dominant representation based their semantic similarity with the dominant representation of the problem (i.e., related to gravity, the sky, or Zoe flying (**Table S3**), and the edges that were related ($n = 21$) or unrelated ($n = 78$) to the dominant representation as the ones that connected nodes respectively related or unrelated to the dominant representation. Edges that connected nodes related and unrelated to the dominant representation ($n = 91$) were not considered. To validate that metrics related to these selected nodes and edges indeed reflected a dominant representation of the problem, we tested

whether they occupied a more substantial position in the SemNets. Supporting our claim, we found that the nodes/edges defined as related to the dominant representation of the problem were more associated, closer, more efficient, more interconnected, and more influent compared to others in both naive SemNet (i.e., before the presentation of the problem) and problem contextualized SemNet (i.e., after the presentation of the problem) (see *Supplementary data*)

Getting close to the solution (GettingClose variable)

We considered a response as close to the solution if participants' response (i) is related to another representation of the usual sky (i.e., response in the "Sky" category), or (ii) is related to a game (i.e., response in the "Game" category), or (iii) is the correct solution (i.e., response in both the "Game" and "Sky" categories). All other responses were defined as far from the solution. The GettingClose variable captured whether a participant was getting closer to the solution between the first and the second solving phase. A participant was considered as getting closer to the solution if he/she moved from a far response (neither in "Sky" nor "Game" category) in the first solving phase to a close response (either in "Sky" or "Game" category or both) in the second solving phase. All alternative situations were not considered as getting closer to the solution, as the subjects in these situations did not take a step forward towards the solution during the incubation phase.

Behavioral and statistical analyses

For both solving phase, we computed the solving rate as the percentage of participants who gave the correct response over the total number of participants. In addition, for the second solving phase, we computed the solving rate independently for each group (Wake, REM, and NREM). We explored whether sleep improved creative problem-solving success by testing whether the solving rate was group-dependent using a Fischer test (corrected with Yates method if needed). We ran the same analyses but using the GettingClose variable (i.e., whether participants became close to the solution) instead of the solving variable.

Finally, additional analyses were conducted to investigate the insight solving (using the Eureka reports), the response confidence of correct and incorrect responses, and the individual attentional level during the solving phases (using the probes). Methodology and results related to these analyses are provided in the *Supplementary Data*.

Semantic network analyses

Semantic network estimation

For each participant, we built an individual SemNet before (preSemNet) and after (postSemNet) the incubation period, based on the corresponding RJT ratings (respectively preRJT and postRJT) (**Figure 1A**). These SemNets represent the organization of solution-relevant and irrelevant terms (i.e., the 20 words of the RJT list) as nodes, with edges representing the relatedness between them based on the individual ratings given during the RJT. Hence, networks are represented as a 20x20 adjacency matrix (one word per row and column) containing all values of the individual RJT ratings. Based on previous studies using this approach (Benedek et al., 2017; Bernard et al., 2019; He et al., 2021; Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022), we applied a weighted undirected network (WUN) thresholding approach. In these estimated WUNs, the relation between node a and node b is equal to the relation between node b and node a (i.e., symmetrical adjacency matrix), all edges are kept in the network, and edges are weighted based on the judgements (without any transformation) provided by each participant during the RJT. The benefit of this methodology is that it avoids any arbitrary thresholding of edges for network filtering.

Semantic network computation

For each SemNet, we computed several metrics that quantify the connectivity properties of a network using the Brain Connectivity Toolbox (version 2019-03-03) (Rubinov & Sporns, 2010) running with Matlab R2020. We used SemNet metrics that have been commonly used in cognitive research (Boccaletti et al., 2006; Borge-Holthoefer & Arenas, 2010; Oldham & Fornito, 2019; Rubinov & Sporns, 2010; Siew et al., 2019). They included: (1) the *Weight* (W), which is the brute strength of association extracted from each word pairs judgment in the RJT (the higher the W , the more associated the words are); (2) the *Shortest*

Path Length (SPL) between all pairs of nodes (the lower the SPL, the closer the words are); (3) the *Efficiency* (Eff), which is the inverse SPL representing the degree to which information can be efficiently exchanged between two nodes (the higher the Eff, the more efficient the connection between two words is); (4) the *Clustering Coefficient* (CC), which represents the degree to which neighbor nodes are also connected to one another (the higher the CC, the more interconnected word are); and (5) the *Eigenvector Centrality* (EV), a self-referential measure of centrality where nodes have a higher EV if they connect to other nodes which themselves have a high centrality (the higher the EV, the more central and influent the word is). Remaining non-responses in the RJT were substituted by a zero for metrics that cannot be computed if missing values are included.

We computed the difference between pre- and postSemNet metrics to explore changes in the properties of SemNets that could be explained by the incubation period. For each metric, we calculated an individual difference between the postSemNet and preSemNet ($\Delta\text{Metric} = \text{Metric}_{\text{postSemNet}} - \text{Metric}_{\text{preSemNet}}$): the higher the ΔMetric , the larger the increase in the considered metric after the incubation period (except for the SPL where it is the opposite).

Statistical analyses

We designed our statistical analyses based on the hypotheses we formulated (one key analysis per metric for a given hypothesis). For the three first hypotheses, we used analyses of variance (ANOVA) with participants always entered as a random effect. All mixed models were run on Rstudio (v 1.4.1717) with *aov* function. Delta Metric was always the dependent variable (continuous variable that represents restructuring of each node or edge) and was z-scored across all participants. We ran the same model independently for each metric that we computed (Weight, SPL, Efficiency, CC end EV). The models can be formalized as follow:

$$\text{M1: } \Delta\text{Metric} = \beta_1 \times \text{Group} + (1 | \text{Subject})$$

$$\text{M2: } \Delta\text{Metric} = \beta_1 \times \text{Group} + \beta_2 \times \text{Dominance} + \beta_3 \times (\text{Group} \times \text{Type}) + (1 | \text{Subject}) + k$$

$$\text{M3: } \Delta\text{Metric} = \beta_1 \times \text{Group} + \beta_2 \times \text{impact rating} + \beta_3 \times (\text{Group} \times \text{impact rating}) + (1 | \text{Subject}) + k$$

M1 explored whether Δ Metric differed between groups (dependent categorical variable: REM, NREM and Wake groups) (Hypothesis 1). This model amounts to considering the effect of the group on the restructuring at the global (SemNet) level (i.e., averaged Δ Metric across edges/nodes at the individual level). M2 tested whether Δ Metric differed depending on the group (REM, NREM and Wake groups) and the node/edge dominance (related or unrelated to the dominant representation, categorical variable). In this model we were particularly interested in the interaction effect of the two factors, which allowed us to assess whether sleep had an impact on a specific type of nodes or edges (i.e., related or not to the dominant representation). M3 tested whether Δ Metric differed as a function of the group (REM, NREM and Wake groups) and the impact rating of node/edges. We used the same impact rating as in our previous study (Bieth et al., 2021), that is a continuous score computed based on an independent rating of nine external judges. For each edge and node, the score represents how much they are important to solve the riddle from -50 (“misleading”) to 50 (“helpful”), centered on 0 (“neutral”). This impact rating allows us to weight word pairs and words according to their relevance for solving the riddle: the higher the impact rating, the more the pair or the word have been assessed as helpful. We previously demonstrated that dynamic changes in helpful edges or nodes were related to successful problem-solving (Bieth et al., 2021), indicating that local metrics of these nodes/edges relate to a solution-relevant mental representation of the problem. In M3, we were particularly interested in the interaction between the group and the impact rating, which represents a change in the SemNet toward a solution-relevant representation.

Significant ANOVA fixed effects were investigated with post hoc tests. For this purpose, we used the same model, but we reduced the group factor so that we could compare the group effect pair-wise. All p value reported in post hoc tests were corrected using the false discovery rate (FDR) for multiple comparisons.

The last hypothesis was explored with a nonlinear mixed model, using *glmer* function on Rstudio (v 1.4.1717). In this case, the dependent variable was the solving (isSolved, binary variable), and the Δ Metric, the impact rating, and the group were the independent variables. We ran the same model independently for each metric that we computed (Weight, SPL, Efficiency, CC end EV). It can be formalized as follow:

$$M4: isSolved = \beta_1 \times \text{Group} + \beta_2 \times \text{Impact Rating} + \beta_3 \times \Delta\text{Metric} + \beta_4 (\text{Group} \times \text{Impact Rating}) + \beta_5 (\text{Group} \times \Delta\text{Metric}) + \beta_6 (\Delta\text{Metric} \times \text{Impact Rating}) + \beta_7 (\text{Group} \times \text{Impact Rating} \times \Delta\text{Metric}) + (-1 + \Delta\text{Metric} | \text{Subject}) + k$$

The goal of this model was to explore if the oriented-solution restructuring was enough to find the solution to the problem. However, as the solving rate was low, we were not able to operationalize M4 because of the sample size (only one solver in NREM group). Instead, we explored whether solution-relevant restructuring was associated with problem-solving, using the following model:

$$M5: \text{GettingClose} = \beta_1 \times \text{Impact Rating} + \beta_2 \times \Delta\text{Metric} + \beta_3 (\Delta\text{Metric} \times \text{Impact Rating}) + (-1 + \Delta\text{Metric} | \text{Subject}) + k$$

This last model explored whether getting closer to the solution was predicted by SemNet restructuring (ΔMetric) and impact rating. We were particularly interested in the interaction between these two terms as it represented whether a change in SemNet toward a solution-relevant representation occurred in the participants who were getting close to the solution. We used the GettingClose variable instead of the sSolved variable in order to increase statistical power of our analysis.

References

- Alger, S. E., & Payne, J. D. (2016). The differential effects of emotional salience on direct associative and relational memory during a nap. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *16*(6), 1150-1163.
- Antrobus, J. (1983). REM and NREM sleep reports : Comparison of word frequencies by cognitive classes. *Psychophysiology*, *20*(5), 562-568.
- Baronchelli, A., Ferrer-i-Cancho, R., Pastor-Satorras, R., Chater, N., & Christiansen, M. H. (2013). Networks in Cognitive Science. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(7), 348-360. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.04.010>
- Barrett, D. (2001). *The committee of sleep : How artists, scientists, and athletes use dreams for creative problem-solving—and how you can too*. Crown House Publishing Limited.
- Beijamini, F., Pereira, S. I. R., Cini, F. A., & Louzada, F. M. (2014). After Being Challenged by a Video Game Problem, Sleep Increases the Chance to Solve It. *PLoS ONE*, *9*(1), e84342. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084342>
- Beijamini, F., Valentin, A., Jäger, R., Born, J., & Diekelmann, S. (2021). Sleep facilitates problem solving with no additional gain through targeted memory reactivation. *Frontiers in behavioral neuroscience*, *30*.
- Benedek, M., Kenett, Y. N., Umdasch, K., Anaki, D., Faust, M., & Neubauer, A. C. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, *23*(2), 158-183. <https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1278034>
- Bernard, M., Kenett, Y. N., Tellez, M. O., Benedek, M., & Volle, E. (2019). *Building individual semantic networks and exploring their relationships with creativity*. 138-144.
- Berry, R. B., Quan, S. F., & Abreu, A. (2020). *The AASM manual for the scoring of sleep and associated events rules, terminology and technical specifications* (Version 2.6). American Academy of Sleep Medicine.
- Bieth, T., Kenett, Y., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Lacaux, C., Oudiette, D., & Volle, E. (2021). *Dynamic changes in semantic memory structure support successful problem-solving*.
- Bizzi, E., & Brooks, D. C. (1963). Pontine reticular formation : Relation to lateral geniculate nucleus during deep sleep. *Science*, *141*(3577), 270-272.
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. (2006). Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, *424*(4-5), 175-308. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>
- Borge-Holthoefer, J., & Arenas, A. (2010). Semantic networks : Structure and dynamics. *Entropy*, *12*(5), 1264-1302.
- Born, J., & Wilhelm, I. (2012). System consolidation of memory during sleep. *Psychological research*, *76*(2), 192-203.
- Bowden, E. M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>
- Brod, S., Pöhlchen, D., Täumer, E., Gais, S., & Schönauer, M. (2018). Incubation, not sleep, aids problem-solving. *Sleep*, *41*(10). <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy155>
- Buzsáki, G. (1989). Two-stage model of memory trace formation : A role for “noisy” brain states. *Neuroscience*, *31*(3), 551-570.
- Buzsáki, G. (1998). Memory consolidation during sleep : A neurophysiological perspective. *Journal of sleep research*, *7*(S1), 17-23.
- Cai, D. J., Mednick, S. A., Harrison, E. M., Kanady, J. C., & Mednick, S. C. (2009). REM, not incubation, improves creativity by priming associative networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(25), 10130-10134. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900271106>

- Carlsson, I., Davidson, P., & Ors, M. (2019). Effects of a Daytime Nap on Primed and Repeated Remote Associates Tests and Relations with Divergent Creativity. *Creativity Research Journal*, *31*(2), 207-214. <https://doi.org/10.1080/10400419.2019.1606619>
- Carr, M., & Nielsen, T. (2015). Morning REM Sleep Naps Facilitate Broad Access to Emotional Semantic Networks. *Sleep*, *38*(3), 433-443. <https://doi.org/10.5665/sleep.4504>
- Casagrande, M., Violani, C., Vereni, P., Lucidi, F., & Bertini, M. (1990). *A linguistic analysis of dream reports based on a cognitive-psycholinguistic model of dream production*. 10-th Congress of the European Sleep Research Society.
- Chow, H. M., Horovitz, S. G., Carr, W. S., Picchioni, D., Coddington, N., Fukunaga, M., Xu, Y., Balkin, T. J., Duyn, J. H., & Braun, A. R. (2013). Rhythmic alternating patterns of brain activity distinguish rapid eye movement sleep from other states of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(25), 10300-10305.
- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological review*, *82*(6), 407.
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2012). Cues to solution, restructuring patterns, and reports of insight in creative problem solving. *Consciousness and Cognition*, *21*(3), 1166-1175. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2012.03.013>
- Danek, A. H., Williams, J., & Wiley, J. (2020). Closing the gap : Connecting sudden representational change to the subjective Aha! experience in insightful problem solving. *Psychological Research*, *84*(1), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-0977-8>
- Darsaud, A., Wagner, U., Balteau, E., Desseilles, M., Sterpenich, V., Vandewalle, G., Albouy, G., Dang-Vu, T., Collette, F., Boly, M., Schabus, M., Degueldre, C., Luxen, A., & Maquet, P. (2010). Neural Precursors of Delayed Insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(8), 1900-1910. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21550>
- Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *Journal of experimental psychology*, *58*(1), 17.
- Deperrois, N., Petrovici, M. A., Senn, W., & Jordan, J. (2022). Learning cortical representations through perturbed and adversarial dreaming. *eLife*, *11*, e76384. <https://doi.org/10.7554/eLife.76384>
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(2), 114-126.
- Diekelmann, S., Born, J., & Wagner, U. (2010). Sleep enhances false memories depending on general memory performance. *Behavioural brain research*, *208*(2), 425-429.
- Dudai, Y. (2012). The restless engram : Consolidations never end. *Annual review of neuroscience*, *35*(1), 227-247.
- Durso, F. T., Rea, C. B., & Dayton, T. (1994). Graph-Theoretic Confirmation of Restructuring During Insight. *Psychological Science*, *5*(2), 94-98. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1994.tb00637.x>
- Fenn, K. M., Gallo, D. A., Margoliash, D., Roediger, H. L., & Nusbaum, H. C. (2009). Reduced false memory after sleep. *Learning & memory*, *16*(9), 509-513.
- Foulkes, D. (1964). Theories of dream formation and recent studies of sleep consciousness. *Psychological Bulletin*, *62*(4), 236.
- Giuditta, A. (2014). Sleep memory processing : The sequential hypothesis. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00219>
- Hasselmo, M. E. (1999). Neuromodulation : Acetylcholine and memory consolidation. *Trends in cognitive sciences*, *3*(9), 351-359.
- He, L., Kenett, Y. N., Zhuang, K., Liu, C., Zeng, R., Yan, T., Huo, T., & Qiu, J. (2021). The relation between semantic memory structure, associative abilities, and verbal and figural creativity. *Thinking & Reasoning*, *27*(2), 268-293. <https://doi.org/10.1080/13546783.2020.1819415>

- Hills, T. T., & Kenett, Y. N. (2021). Networks of the Mind : How Can Network Science Elucidate Our Understanding of Cognition? *Topics in Cognitive Science*.
- Hobson, J. A. (1997). *Dreaming as delirium : A mental status analysis of our nightly madness*. 17(02), 121-128.
- Hobson, J. A., & Stickgold, R. (1994). Dreaming : A neurocognitive approach. *Consciousness and Cognition*, 3(1), 1-15.
- Hoedlmoser, K., Peigneux, P., & Rauchs, G. (2022). Recent advances in memory consolidation and information processing during sleep. *Journal of sleep research*.
- Hořda, M., Ğłodek, A., Dankiewicz-Berger, M., Skrzypińska, D., & Szmigielska, B. (2020). Ill-defined problem solving does not benefit from daytime napping. *Frontiers in psychology*, 11, 559.
- Howe, M. L., Wimmer, M. C., Gagnon, N., & Plumpton, S. (2009). An associative-activation theory of children's and adults' memory illusions. *Journal of Memory and Language*, 60(2), 229-251.
- Jouvet, M., Michel, F., & Courjon, J. (1959). Sur un stade d'activité électrique cérébrale rapide au cours du sommeil physiologique. *CR Soc Biol*, 153, 1024-1028.
- Klinzing, J. G., Niethard, N., & Born, J. (2019). Mechanisms of systems memory consolidation during sleep. *Nature neuroscience*, 22(10), 1598-1610.
- Lacaux, C., Andrillon, T., Bastoul, C., Idir, Y., Fonteix-Galet, A., Arnulf, I., & Oudiette, D. (2021). Sleep onset is a creative sweet spot. *Science Advances*, 7(50), eabj5866.
- Lacaux, C., Isabelle, C., Santantonio, G., De Villèle, L., Frain, J., Lubart, T., Pizza, F., Plazzi, G., Arnulf, I., & Oudiette, D. (2019). Increased creative thinking in narcolepsy. *Brain*, 142(7), 1988-1999.
- Landmann, N., Kuhn, M., Maier, J.-G., Feige, B., Spiegelhalder, K., Riemann, D., & Nissen, C. (2016). Sleep Strengthens but does Not Reorganize Memory Traces in a Verbal Creativity Task. *Sleep*, 39(3), 705-713. <https://doi.org/10.5665/sleep.5556>
- Landmann, N., Kuhn, M., Piosczyk, H., Feige, B., Baglioni, C., Spiegelhalder, K., Frase, L., Riemann, D., Sterr, A., & Nissen, C. (2014). The reorganisation of memory during sleep. *Sleep medicine reviews*, 18(6), 531-541.
- Lau, H., Alger, S. E., & Fishbein, W. (2011). Relational Memory : A Daytime Nap Facilitates the Abstraction of General Concepts. *PLoS ONE*, 6(11), e27139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027139>
- Laukkonen, R. E., & Tangen, J. M. (2018). How to detect insight moments in problem solving experiments. *Frontiers in psychology*, 9, 282.
- Lewis, P. A., Knoblich, G., & Poe, G. (2018). How Memory Replay in Sleep Boosts Creative Problem-Solving. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(6), 491-503. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.009>
- Llewellyn, S., & Hobson, J. A. (2015). Not only... but also : REM sleep creates and NREM Stage 2 instantiates landmark junctions in cortical memory networks. *Neurobiology of learning and memory*, 122, 69-87.
- Lo, J. C., Sim, S. K., & Chee, M. W. (2014). Sleep reduces false memory in healthy older adults. *Sleep*, 37(4), 665-671.
- Malinowski, J. E., & Horton, C. L. (2021). Dreams reflect nocturnal cognitive processes : Early-night dreams are more continuous with waking life, and late-night dreams are more emotional and hyperassociative. *Consciousness and Cognition*, 88, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.103071>
- McKeon, S., Pace-Schott, E. F., & Spencer, R. M. C. (2012). Interaction of Sleep and Emotional Content on the Production of False Memories. *PLoS ONE*, 7(11), e49353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049353>
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69, 220-232.
- Newbury, C. R., & Monaghan, P. (2019). When does sleep affect veridical and false memory consolidation ? A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(2), 387-400.

- Nielsen, T. A. (2000). A review of mentation in REM and NREM sleep : “Covert” REM sleep as a possible reconciliation of two opposing models. *Behavioral and Brain Sciences*, 23(6), 851-866. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0000399X>
- Oldham, S., & Fornito, A. (2019). The development of brain network hubs. *Developmental cognitive neuroscience*, 36, 100607.
- Oldham, S., Fulcher, B., Parkes, L., Arnatkevičiūtė, A., Suo, C., & Fornito, A. (2019). Consistency and differences between centrality measures across distinct classes of networks. *PLOS ONE*, 14(7), e0220061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220061>
- Ovando-Tellez, M., Benedek, M., Kenett, Y. N., Hills, T., Bouanane, S., Bernard, M., Belo, J., Bieth, T., & Volle, E. (2022). An investigation of the cognitive and neural correlates of semantic memory search related to creative ability. *Communications biology*, 5(1), 1-16.
- Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., Bieth, T., & Volle, E. (2022). Brain connectivity-based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eabl4294. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4294>
- Paller, K. A., Creery, J. D., & Schechtman, E. (2021). Memory and sleep : How sleep cognition can change the waking mind for the better. *Annual review of psychology*, 72(1).
- Pardilla-Delgado, E., & Payne, J. D. (2017). The impact of sleep on true and false memory across long delays. *Neurobiology of learning and memory*, 137, 123-133.
- Payne, J. D., Schacter, D. L., Propper, R. E., Huang, L.-W., Wamsley, E. J., Tucker, M. A., Walker, M. P., & Stickgold, R. (2009). The role of sleep in false memory formation. *Neurobiology of learning and memory*, 92(3), 327-334.
- Peigneux, P., Laureys, S., Delbeuck, X., & Maquet, P. (2001). Sleeping brain, learning brain. The role of sleep for memory systems. *Neuroreport*, 12(18), A111-A124.
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2 : Experiments in behavior made easy. *Behavior research methods*, 51(1), 195-203.
- Perdomo, V., Hofman, W., & Talamini, L. (2018). Sleep fosters insight into real-life problems. *Archives Italiennes de biologie*, 156(3), 87-98.
- Rasch, B., & Born, J. (2007). Maintaining memories by reactivation. *Current opinion in neurobiology*, 17(6), 698-703.
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep’s role in memory. *Physiological reviews*.
- Rasmusson, D. (2000). The role of acetylcholine in cortical synaptic plasticity. *Behavioural brain research*, 115(2), 205-218.
- Rittenhouse, C. D., Stickgold, R., & Hobson, J. A. (1994). Constraint on the transformation of characters, objects, and settings in dream reports. *Consciousness and cognition*, 3(1), 100-113.
- Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories : Remembering words not presented in lists. *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(4), 803.
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity : Uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059-1069. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003>
- Sanders, K. E. G., Osburn, S., Paller, K. A., & Beeman, M. (2019). Targeted Memory Reactivation During Sleep Improves Next-Day Problem Solving. *Psychological Science*, 30(11), 1616-1624. <https://doi.org/10.1177/0956797619873344>
- Schönauer, M., Brodt, S., Pöhlchen, D., Breßmer, A., Danek, A. H., & Gais, S. (2018). Sleep Does Not Promote Solving Classical Insight Problems and Magic Tricks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 72. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00072>
- Siew, C. S., Wulff, D. U., Beckage, N. M., & Kenett, Y. N. (2019). Cognitive network science : A review of research on cognition through the lens of network representations, processes, and dynamics. *Complexity*, 2019.

- Sio, U. N., Monaghan, P., & Ormerod, T. (2013). Sleep on it, but only if it is difficult : Effects of sleep on problem solving. *Memory & Cognition*, *41*(2), 159-166. <https://doi.org/10.3758/s13421-012-0256-7>
- Steyvers, M., & Tenenbaum, J. B. (2005). The large-scale structure of semantic networks : Statistical analyses and a model of semantic growth. *Cognitive science*, *29*(1), 41-78.
- Stickgold, R., Scott, L., Rittenhouse, C., & Hobson, J. A. (1999). Sleep-Induced Changes in Associative Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(2), 182-193. <https://doi.org/10.1162/089892999563319>
- van Casteren, M., & Davis, M. H. (2006). Mix, a program for pseudorandomization. *Behavior research methods*, *38*(4), 584-589.
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, *427*(6972), 352-355.
- Walker, M. P., Liston, C., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2002). Cognitive flexibility across the sleep-wake cycle : REM-sleep enhancement of anagram problem solving. *Cognitive Brain Research*, *14*(3), 317-324.
- Wamsley, E. J., & Stickgold, R. (2010). Dreaming and offline memory processing. *Current Biology*, *20*(23), R1010-R1013.
- Wamsley, E. J., Tucker, M., Payne, J. D., Benavides, J. A., & Stickgold, R. (2010). Dreaming of a learning task is associated with enhanced sleep-dependent memory consolidation. *Current Biology*, *20*(9), 850-855.
- Whitehurst, L. N., Cellini, N., McDevitt, E. A., Duggan, K. A., & Mednick, S. C. (2016). Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(26), 7272-7277.
- Zadra, A. L., Nielsen, T. A., & Donderi, D. C. (1998). Prevalence of auditory, olfactory, and gustatory experiences in home dreams. *Perceptual and motor skills*, *87*(3), 819-826.
- Zander, T., Volz, K. G., Born, J., & Diekelmann, S. (2017). Sleep increases explicit solutions and reduces intuitive judgments of semantic coherence. *Learning & Memory*, *24*(12), 641-645.

Competing interests

The authors declare that they have no competing conflict of interests.

Data availability

The study reported in this article was not formally preregistered. Experimental material is available in the Supplementary data associated with this article. The data sets generated and/or analyzed during the current study, and the scripts written will be available in a persistent repository. Data sharing will be anonymized and will not include participants' demographical information.

Acknowledgment

This research was partly funded by the 'Agence Nationale de la Recherche' [grant number ANR-19-CE37-001-01] (EV, DO, TB), and received infrastructure funding from the French program "Investissements d'avenir" ANR-10-IAIHU-06 (EV, DO). TB also received funding from the 'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris'. MOT is funded by Becas-Chile of ANID (CONICYT). CL is funded by the Doctoral school ED3C and 'Société Française de Recherche et Médecine du Sommeil' (SFRMS). Part of this work was carried out in the sleep center coordinated by IA at the Pitié-Salpêtrière hospital. We thank all the participants to the study.

Supplementary figure

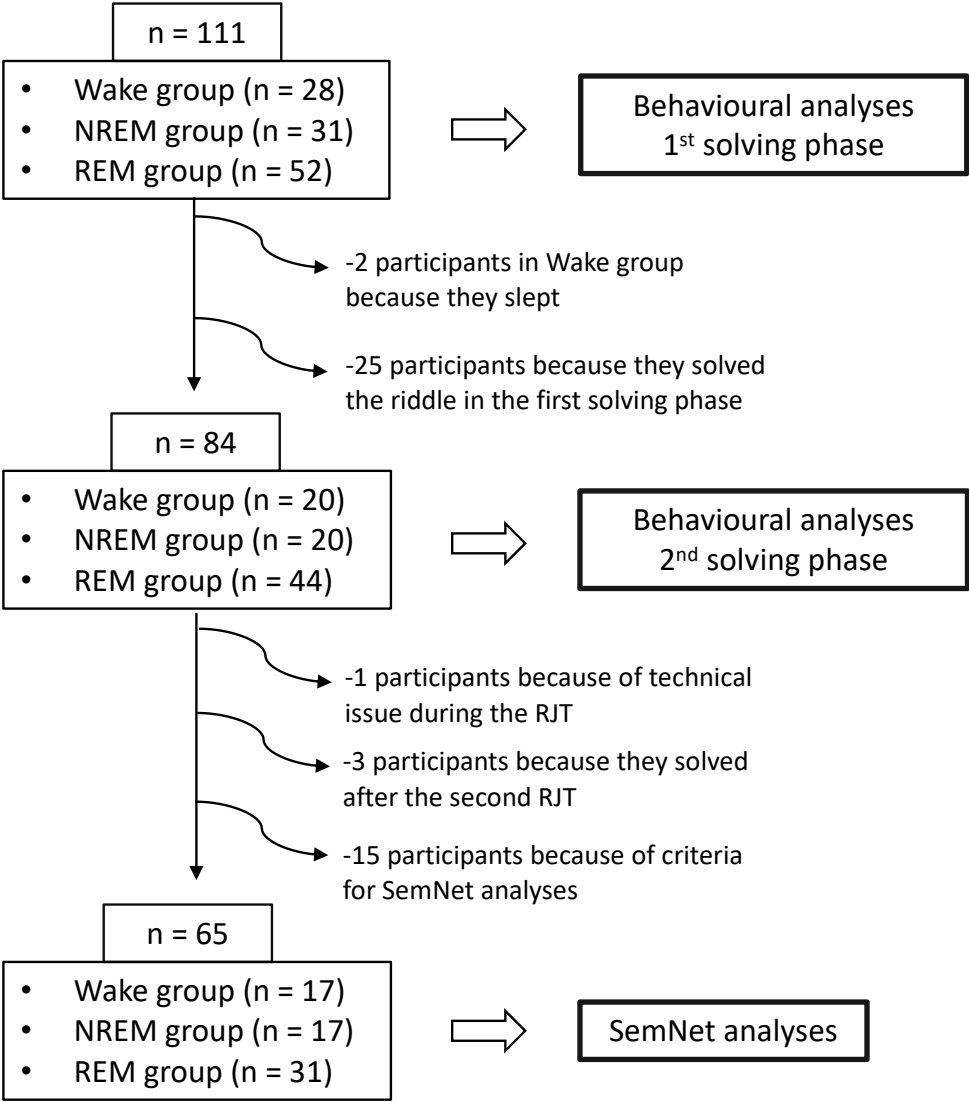


Figure S1. Flow chart. RJT – relatedness judgment task; SemNet – semantic network

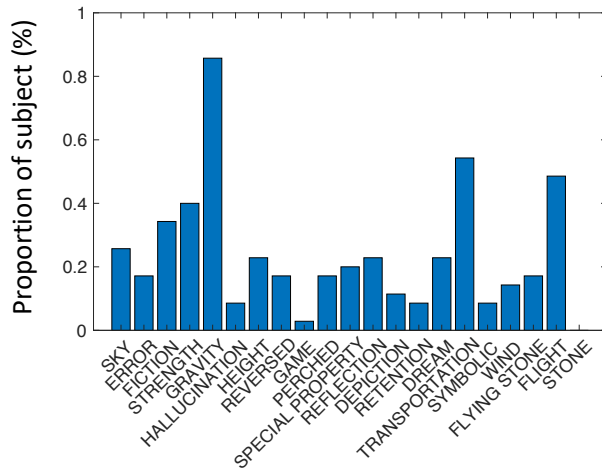
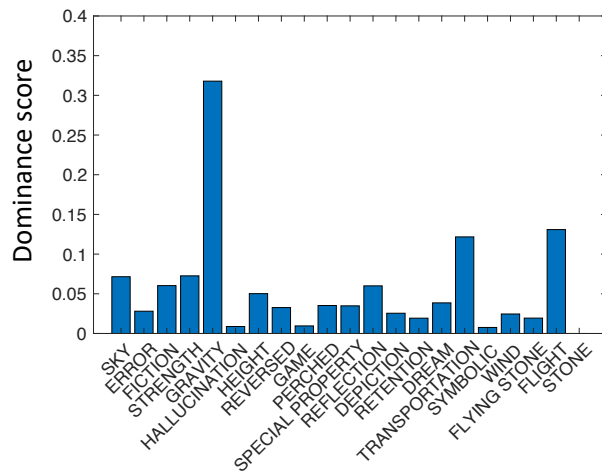
A**B**

Figure S2. Dominant representation of the problem. A. Proportion of subject (%) who proposed a response corresponding to each predefined category (x axis). **B.** Dominance score for each of the 21 categories. It corresponds to the average value of individual proportion of a response in a given category related to the total number of responses.

Supplementary tables

Category	Definition
Zoe literally throws a stone that lands in the sky	
Flight	Zoe is flying (e.g., on a plane, an air balloon or a rocket)
Flying stone	The stone flies by itself
Gravity	Context of absence of gravity (e.g., the setting is space or on the moon)
Height	Zoe throws the stone from an elevated place
Perched	The stone lands on something above the ground
Special property	The stone has a special property that enables it able to land in the sky (e.g., very light)
Retention	Something keeps the stone in the sky (e.g., a magnet)
Strength	The stone is thrown with strength (by Zoe or with the help of a machine)
Transportation	A flying device takes the stone to the sky (e.g., a bird or plane wings)
Wind	Context of wind carrying the stone to the sky
Zoe throws a stone, but it does not literally land in the sky	
Reversed	Earth and sky are reversed
Game	Context of a game (e.g., Zoe plays a game)
Reflection	Zoe throws the stone on something that reflects the sky (e.g., water, mirror...)
Sky	The sky refers to something other than the usual physical sky (e.g., a painting or a drawing)
Zoe does not really throw a stone in the sky	
Dream	Zoe is dreaming
Error	Zoe is mistaken or is lying
Fiction	Context of a fictional narrative fiction (e.g., a novel or a movie)
Hallucination	Zoe is hallucinating or on drugs
Depiction	Figural depiction of the scene (e.g., a drawing or a theatre play)
Stone	The stone is not a real stone (e.g., it is a bird)
Symbolic	Metaphoric phrase or symbolic meaning of the riddle

Table S1. List of categories used to classify the responses.

		df M	df R	F value	p value
Hypothesis 2: ΔMetric = Group x Dominance + (1 Subject)					
ΔWeight	Type	1	6019	.73	.39
	Group x Type	2	6019	2.28	.10
ΔSPL	Type	1	6367	55.37	1.13e-13
	Group x Type	2	6367	15.17	2.68e-07
ΔEfficiency	Type	1	6367	3.77	.053
	Group x Type	2	6367	.80	.45
ΔCC	Type	1	1232	2.03	.15
	Group x Type	2	1232	1.19	.20
ΔEV	Type	1	1232	.37	.54
	Group x Type	2	1232	7.13	8.34e-04
Hypothesis 3: ΔMetric = Group x impact rating + (1 Subject)					
ΔWeight	Impact rating	1	11576	4.75	.03
	Group x impact rating	2	11576	.54	.59
ΔSPL	Impact rating	1	12282	34.96	3.45e-09
	Group x impact rating	2	12282	22.89	1.20e-10
ΔEfficiency	Impact rating	1	12282	.03	.87
	Group x impact rating	2	12282	.72	.49
ΔCC	Impact rating	1	1232	1.32	.25
	Group x impact rating	2	1232	.49	.61
ΔEV	Impact rating	1	1232	.03	.87
	Group x impact rating	2	1232	4.08	.017

Table S2. Statistical results summary. ANOVAs with mixed effect (M2 and M3)

Word list

French	English
air	air
arrivée	arrival
atterrir	to land
avion	plane
caillou	stone
chaussure	shoe
chiffre	number
ciel	sky
cour	yard
dessin	drawing
écrire	to write
espace	space
gravité	gravity
jardin	garden
lancer	to throw
ped	foot
sauter	to jump
sol	ground
tracer	to trace
voler	to fly

Table S3. Riddle-specific word lists used in the RJT. Lists of 20 words preselected for each riddle with their respective English translations. Word in bold were related to the dominant representation of the problem.

		β	Standard Error	z value	p value
GettingClose = ΔMetric x impact rating + (-1 + ΔMetric Subject)					
Weight	Δ Metric	0.20	0.09	2.33	.02
	Impact rating	-0.02	0.03	-0.74	.46
	Δ Metric x Impact rating	0.04	0.03	1.34	.18
SPL	Δ Metric	-0.36	0.18	-1.95	.052
	Impact rating	-0.05	0.03	-1.84	.065
	Δ Metric x Impact rating	-0.03	0.04	-0.76	.45
Efficiency	Δ Metric	0.22	0.10	2.29	.02
	Impact rating	-0.01	0.02	-0.61	0.54
	Δ Metric x Impact rating	0.07	0.03	2.56	.01
CC	Δ Metric	1.29	0.75	1.71	.09
	Impact rating	-0.02	0.16	-0.16	.87
	Δ Metric x Impact rating	0.19	0.20	0.92	.36
EV	Δ Metric	0.09	0.07	1.25	.21
	Impact rating	-0.02	0.07	-0.30	.77
	Δ Metric x Impact rating	0.23	0.07	3.21	1.32e-03

Table S4. Statistical results summary. Nonlinear mixed model (M5)

Supplementary results

Solving the riddle is associated with insight solving

We explored whether successful problem-solving was associated with a Eureka report using a chi-square analysis (corrected with Yates method when needed). For this test, we used all the participants pooled together (without considering their groups), excluding missing values. This was because the low solving rate in the second solving phase did not allow us to explore whether the participants' group influenced the frequency of Eureka. The analysis was repeated in each solving phase independently.

The proportion of Eureka was significantly higher for correct responses than incorrect ones, both in the first (56.52% and 19.37% respectively, $\chi^2(1) = 16.62$, $p = 4.58 \cdot 10^{-5}$) and the second solving phase (77.78% and 20.15% respectively, $\chi^2(1) = 13.65$, $p = 2.20 \cdot 10^{-4}$). It is consistent with the findings of our previous study (Bieth et al., 2021), showing that solvers reported a Eureka feeling, suggesting that our riddle was related to an insight problem-solving.

Solvers are confident with their response

We compared the averaged confidence across participants between correct and incorrect responses using two-tailed paired-samples t-test analyses. As for the previous analysis, we did not consider the participants' group influence.

Participants were more confident in the appropriateness of their responses when their response was the correct solution than when it was not, both in the first ($M = 76.11 \pm 28.49$ and $M = 37.05 \pm 30.26$ respectively, $t(719) = 6.10$, $p = 1.72 \cdot 10^{-9}$) and the second solving phase ($M = 79.35 \pm 40.82$ and $M = 40.82 \pm 29.93$ respectively, $t(277) = 4$, $p = 8.16 \cdot 10^{-5}$).

Attentional focus during solving phases

For each attentional probe, we computed the proportion of participants who reported being focused on the riddle, distracted by the environment, having riddle-unrelated thoughts, or having no thoughts. Participants who found the solution to the riddle were excluded at the time point they wrote the correct responses as being confident in one's solution would

potentially decreases the need to actively look for novel solutions, thus distracting participants away of the task. For each attentional probe and each solving phase, we compared the proportion of participants who reported being focused on the riddle between the Sleep and Wake group using a chi-square analyses (corrected with Yates method when needed).

In both solving phase, the proportion of participants who reported being focused on finding solutions to the riddle remained above 50%, except for the four last minutes in the first solving phase (**Figure S3**). This proportion was not significantly different than the proportion of participant reported not being focused whether they slept or not for each probe of both the first solving phase (probe 1: 86% and 82% respectively, $\chi^2(1) = 0.03$, $p = .86$; probe 2: 77% and 64% respectively, $\chi^2(1) = 1.58$, $p = .21$; probe 3: 62% and 55% respectively, $\chi^2(1) = 0.42$, $p = .52$; probe 4: 49% and 41% respectively, $\chi^2(1) = 0.39$, $p = .53$; and probe 5: 46% and 45% respectively, $\chi^2(1) = 0.003$, $p = .95$) and the second solving phase (probe 1: 59% and 62% respectively, $\chi^2(1) = 0.07$, $p = .80$; probe 2: 67% and 55% respectively, $\chi^2(1) = 0.90$, $p = .34$; probe 3: 72% and 55% respectively, $\chi^2(1) = 1.90$, $p = .17$; and probe 4: 62% and 63% respectively, $\chi^2(1) = 0.01$, $p = .91$). As all participants started the experiments in the same conditions (i.e., a partial sleep restriction), this result emphasis that, even if the Wake group did not sleep during the incubation, they were as involved in the task as the Sleep group.

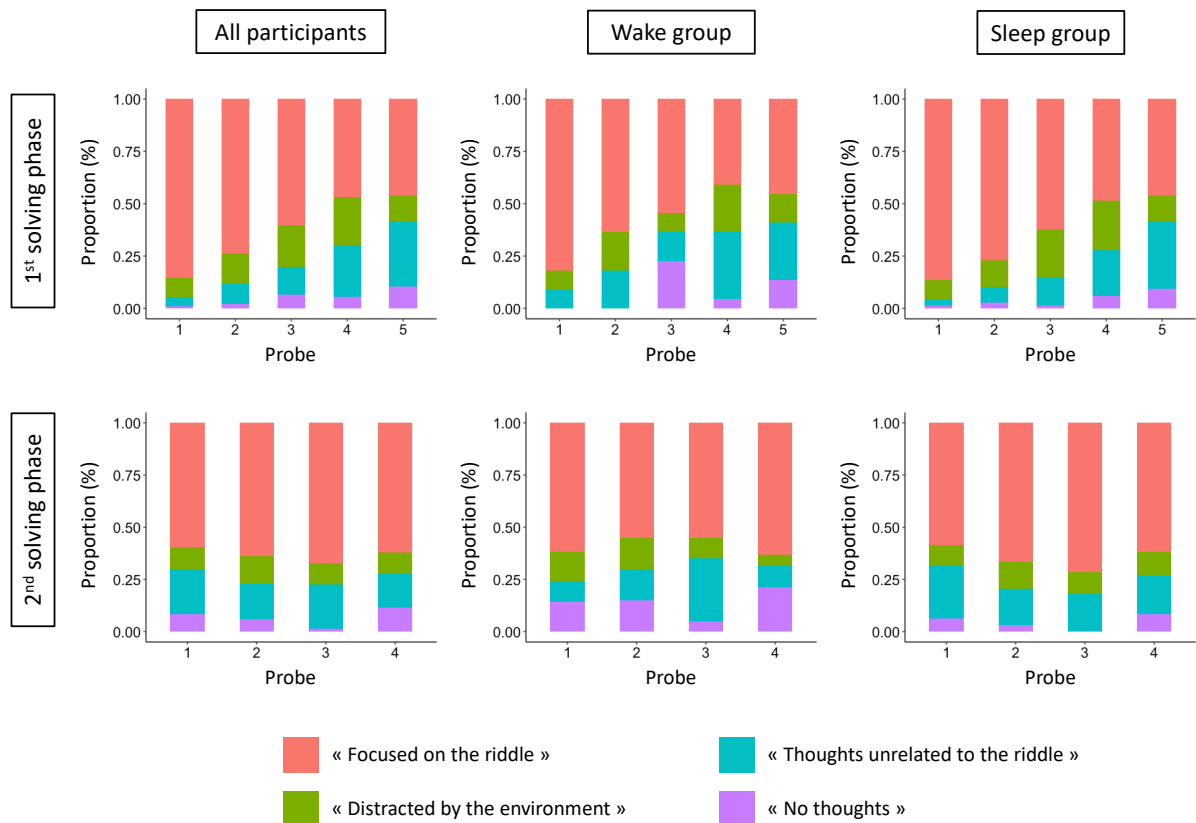


Figure S3. Attentional focus during the solving phase. Bar plots representing the proportion of responses to each attentional probe (one every 2 minutes for the first solving phase, at the top; one every minute for the second one, at the bottom) for each category (“Focused on the riddle” in red, “Distracted by the environment” in green, “Thoughts unrelated to the riddle” in blue, and “No thought” in purple). The proportions were computed by including only participants who did not solve the riddle at the time the probe was displayed. These proportions were calculated for all the participants together (left), only the Wake group (center), and only the Sleep group (right).

Edges and nodes related to the dominant representation were better represented in SemNet

We used the same previous independent sample of participants ($n = 35$) who failed to solve the same riddle (Bieth et al., 2021). In this study, SemNets were computed before the presentation of the problem (naive SemNet) and after attempting to solve it (problem contextualized SemNet). To validate that metrics related to these pre-selected nodes and edges indeed reflected a dominant representation of the problem, we tested whether they occupied a more substantial position in these SemNets. We used ANOVAs considering participant as a random effect. In this model, we explored whether Δ Metric (dependant variable) differed depending on the node/edge dominance (i.e., related or not to the

dominant representation of the problem). We ran a model for each computed metric (Weight, SPL, Efficiency, CC, EV) and each SemNet (naive and problem contextualized SemNet).

Supporting our claim, we found that the nodes/edges defined as related to the dominant representation of the problem were more associated, closer, more efficient, more interconnected, and more influent compared to others in both naive SemNet (W: $F(1,2517) = 1210$, $p < 10^{-16}$; SPL: $F(1,2547) = 674.5$, $p < 10^{-16}$; Eff: $F(1,2547) = 1418$, $p < 10^{-16}$; CC: $F(1,493) = 217.5$, $p < 10^{-16}$; EV: $F(1,493) = 351.5$, $p < 10^{-16}$) and problem contextualized SemNet (W: $F(1,2480) = 1387$, $p < 10^{-16}$; SPL: $F(1,2547) = 709.8$, $p < 10^{-16}$; Eff: $F(1,2547) = 1649$, $p < 10^{-16}$; CC: $F(1,493) = 218$, $p < 10^{-16}$; EV: $F(1,493) = 355.7$, $p < 10^{-16}$).

Chapitre 3

DISCUSSION GENERALE

Résumé synthétique

Partie 1 : Le phénomène de restructuration

Partie 2 : LE sommeil comme modulateur de la restructuration

Partie 3 : Cerveau en restructuration

Partie 4 : Une vision intégrative de la restructuration pour des applications pratiques

Conclusion

Résumé synthétique

Dans ce travail, nous avons tenté de répondre à des questions portant sur la résolution de problèmes. Plus précisément, nous avons, par plusieurs approches expérimentales, décrit des mécanismes associés à la résolution de problème créatifs et analogues à plusieurs niveaux (**Figure 27**).

D'abord, à l'échelle des **mécanismes cognitifs** (partie 1). Par l'utilisation d'une méthodologie utilisant les réseaux sémantiques, **nous avons capturé la restructuration par la quantification de la réorganisation des associations d'idées relatives à un problème et l'avons mise en lien avec sa résolution** (étude 1A). L'application de cette méthode a été étendue aux mécanismes cognitifs impliqués dans le transfert par analogie dans la résolution de problèmes. **Nous avons montré que la restructuration du problème initial était associée à la résolution d'un problème analogue** (étude 1B). De plus, par réplification d'études antérieures, **nous avons confirmé le rôle du transfert par analogie dans la résolution de problèmes en utilisant de nouveaux problèmes et une nouvelle tâche expérimentale** (étude 1B).

Ensuite, à l'échelle des **mécanismes cérébraux** (partie 2). Nous avons étudié les variations oscillatoires associées à deux capacités indirectement en lien avec les **processus associés à la restructuration** : celle de **former et combiner des associations éloignées** et celle de **résoudre le problème avec insight**. Nous avons montré que ces deux processus semblaient **indépendants** et présentaient des **signatures temporo-spatiales et fréquentielles électrophysiologiques spécifiques** (étude 2).

Enfin, à l'échelle des **mécanismes modulateurs** en ciblant spécifiquement le sommeil (partie 3) et en séparant son effet sur la restructuration de celui sur la résolution de problèmes. En utilisant la méthode des réseaux sémantiques développées précédemment, **nous avons montré que le sommeil paradoxal facilitait les processus de restructuration en rapport avec un problème**. Ces résultats permettent de confirmer les modèles théoriques

associant le sommeil paradoxal à un état mental d'hyper-associativité (étude 3). Cependant, nous n'avons pas observé d'effet modulateur du sommeil paradoxal sur la résolution du problème.

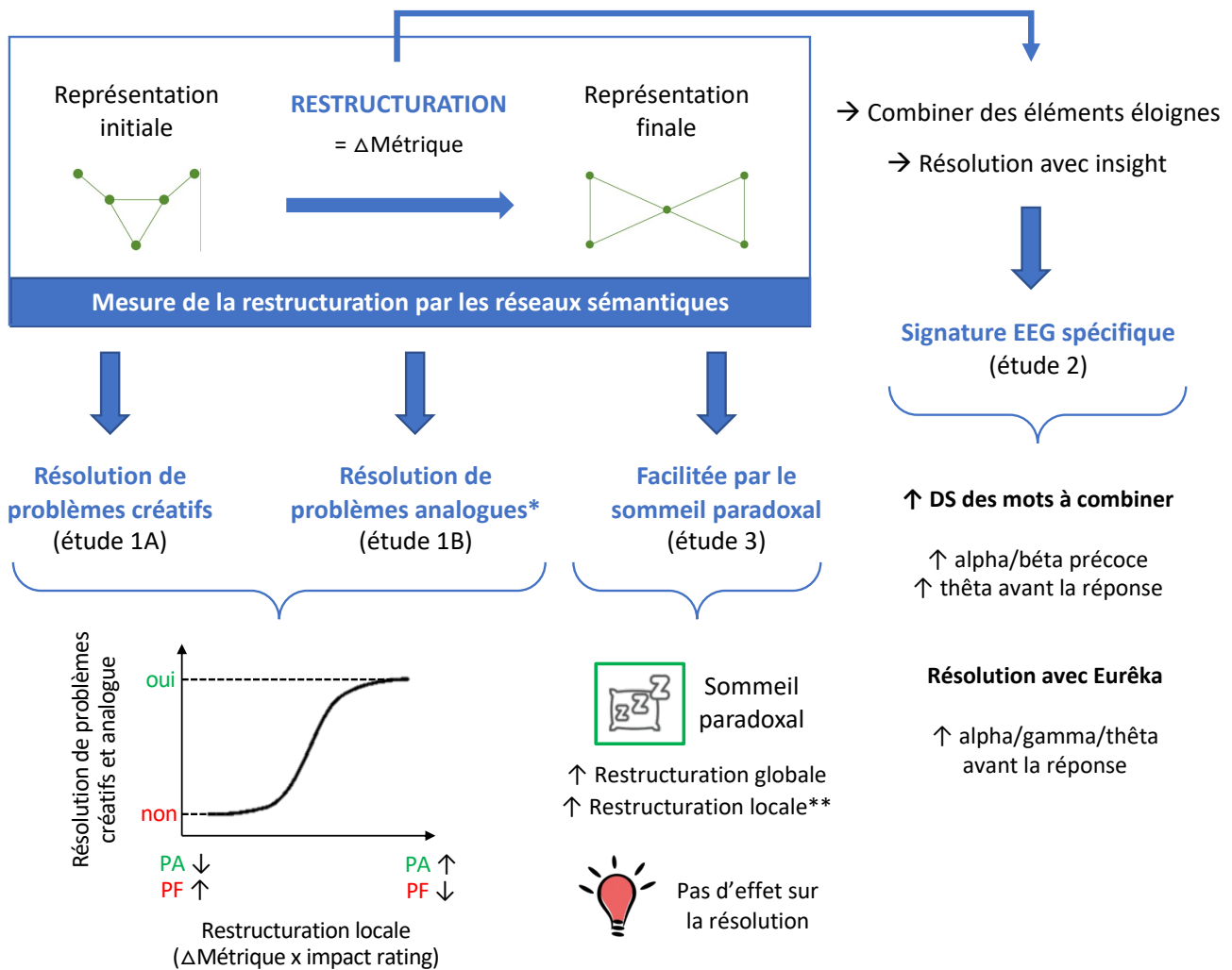


Figure 27. Vision synthétique des principaux résultats des études présentées. PA – paire aidante, PF – paire fixante, DS – distance sémantique.

* La restructuration d'un problème permet de prédire la résolution d'un problème analogue.

** La restructuration locale concerne les nœuds et liens qui ne sont pas en rapport avec la représentation dominante du problème et qui sont en rapport avec la solution du problème.

Dans ce chapitre, nous proposons de discuter, étendre et mettre en perspective nos résultats de manière structurée autour de quatre axes : (i) le phénomène de restructuration (ses méthodes de quantification et son rôle dans la résolution de problèmes), (ii) le rôle du

sommeil (facteur d'intérêt étudié dans ce travail) dans la modulation de la restructuration et de la résolution de problèmes, (iii) les bases neurales de la restructuration en intégrant les retombées des résultats de notre étude EEG et proposant de nouvelles perspectives méthodologiques envisagées dans ce domaine, et (iv) l'application concrète de la restructuration à d'autres domaines cruciaux tels que l'éducation et les apprentissages scolaires mais également dans le développement d'outils médicaux.

Partie 1

Le phénomène de restructuration

Sommaire	p.
1.1 Les réseaux sémantique, un outil de mesure de la restructuration	303
Construction des réseaux sémantiques par jugements d'associations de paires de mots	
Les réseaux sémantiques dans la quantification de la restructuration	
1.2 La restructuration dans la résolution de problèmes	308
Mécanisme ou marqueur ?	
La restructuration dans le transfert par analogie	
Spécificité et généralisation de l'effet	

Les deux premières études de ce travail exposent les liens qui existent entre les phénomènes de restructuration (i.e., la réorganisation des associations d'idées relatives à un problème) avec la résolution d'un problème créatif (étude 1A) et analogue (étude 1B). Pour quantifier les processus de restructuration, nous avons utilisé des réseaux sémantiques relatifs à un problème. L'utilisation des réseaux sémantiques pour l'étude de processus tel que la restructuration et son implication dans la résolution de problèmes est une approche nouvelle et originale. Dans cette partie, nous discutons des avantages et limites de cette méthode pour ensuite aborder le rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes créatifs puis analogues.

1.1 Les réseaux sémantiques, un outil de mesure de la restructuration

Construction des réseaux sémantiques par jugements d'associations de paires de mots

Pour construire des réseaux sémantiques, plusieurs méthodes sont disponibles pour estimer la distance sémantique entre les mots du réseau (Zemla & Austerweil, 2018). Certaines utilisent une tâche d'associations sémantiques libres (e.g., chat : chien – os – squelette – fracture – hôpital – ...) ou de fluence sémantique (e.g., animal : chien – chat – panthère – lion – girafe – ...). D'autres approches approximent la distance sémantique par la distance séparant deux mots dans des espaces sémantiques variés construits sur des corpus de texte (Beaty et al., 2022; De Deyne et al., 2017). Dans notre étude, nous avons construit les réseaux sémantiques des individus en utilisant la méthode de jugements d'association de paires de mots via la RJT (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019). Cette méthode a déjà montré son efficacité et sa validité dans des études antérieures, notamment pour étudier le lien entre l'organisation des réseaux sémantiques et des traits de créativité (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019; M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Yan et al., 2021). Contrairement aux autres méthodes, celle utilisant la RJT présente l'avantage de construire des réseaux sémantiques à l'échelle des individus. Dans notre cas d'étude, cela s'avère pertinent car cela nous permet de prendre en compte les expériences et les connaissances de chacun dans le réseau basal et de l'intégrer dans les changements d'organisation du réseau qui sont composés des mêmes nœuds. Cela nous a permis également de rendre les réseaux comparables pour chaque individu mais également entre les individus. Nous avons pu utiliser des approches statistiques permettant d'évaluer le lien entre la restructuration et la résolution de problèmes en intégrant la variabilité inter individuelle, limitant ainsi la présence de facteurs confondants propres à l'individu (e.g., son potentiel de créativité, ou encore son utilisation plus ou moins large de l'échelle visuelle dans les jugements d'associations de mots).

Dans notre approche, nous avons considéré que les jugements d'associations de mots pendant la RJT permettaient de refléter les associations d'idées relatives à un problème, déterminant ainsi la manière dont un individu peut se le représenter. Ce point est discutable.

Il n'est pas exclu que la RJT capture d'autres paramètres tels que des processus d'amorçage sémantique, ou que les jugements au cours de la tâche s'influencent les uns les autres et se parasitent par des processus mnésiques, de dissonance cognitive ou encore par des pensées métacognitives sur son jugement. Afin de limiter ces effets, la présentation des paires de mots pendant la RJT était pseudo randomisée de telles façons que chaque mot apparaissait autant à droite qu'à gauche, et n'était pas présent dans deux paires de mots successives. Cependant, afin de rendre comparable les jugements en intra et inter individuel, l'ordre pseudo randomisé a été figé pour toutes les RJT. De plus, pour limiter l'effet de surprise dans les paires de mots à juger et permettre aux participants d'avoir une idée des liens à établir, la liste de mots a été préalablement présentée aux participants avant de commencer la RJT. Enfin, pour induire au maximum un jugement le plus spontané possible, nous avons insisté explicitement dans les instructions sur l'importance de répondre spontanément et avons limité le temps de réponse maximale pour juger chaque association de mots.

L'objectif de la RJT est de capturer des jugements rapides reflétant une associativité spontanée entre des concepts. Par exemple, une association spontanée entre « ciel » et « voler » suggère que le mot ciel dans le problème va activer le concept de voler et que le jugement des sujets dans la tâche peut approximer cette association. La liste de mots utilisée dans la RJT est donc un point important. Elle doit cibler des mots à la fois en rapport avec la solution (sans être trop évident), et pouvoir capturer des représentations alternatives du problème. Cependant, il est difficile d'avoir une liste de mots qui capture l'ensemble des représentations possibles d'un problème, en particulier en respectant la contrainte de temps. En effet, la durée de cette tâche étant d'autant plus longue qu'il y a de mots différents, la sélection des mots de la liste doit être réfléchi pour optimiser le nombre de mots sans que la procédure ne soit trop répétitive et lassante. La catégorisation des réponses réalisée dans l'étude 3 montre bien la difficulté à équilibrer cette balance. Bien que la grande majorité des catégories de réponses soient représentées dans les mots de la liste (e.g., l'idée de la gravité ou de voler), certaines ne le sont pas (e.g., l'idée de la magie ou des hallucinations dans l'énigme de Zoé). Ainsi, il n'est pas exclu que certains participants aient pleins d'idées (témoignant de différentes représentations du problème) qui ne soient pas capturées par les mots de notre liste.

Pour optimiser la construction du réseau sémantique, d'autres méthodes que la RJT pourraient être développées pour s'affranchir de l'action de juger dont le caractère spontané est toujours incertain. Par exemple, chaque paire de mots pourrait être utilisée dans un paradigme d'amorçage. Plus l'individu reconnaît rapidement un mot amorcé par un autre, plus cette association de mots est forte dans son système de mémoire sémantique. Les réseaux sémantiques qui en résulteraient ne seraient pas pondérés par la force d'association jugée par les participants mais par l'ampleur de l'effet d'amorçage quantifié par le temps de réponse. Cette mesure est sûrement plus représentative d'une association spontanée car elle se détache de l'action de jugement. Elle présente également l'avantage d'informer sur une direction dans l'association (amorçage vers cible). Cette méthode présente cependant des obstacles méthodologiques qui sont encore à résoudre. En particulier, si toutes les paires doivent être testées (190 dans notre cas multiplié par deux pour capturer le lien bidirectionnel de chaque paire de mots), la répétition des mêmes mots à la place d'amorceur ou de cible risque de supprimer l'effet d'amorçage. De plus, l'effet d'amorçage au niveau intra-individuel et intra-essai est difficile à capturer. Malgré ces limites, cette approche mériterait d'être explorée.

Les réseaux sémantiques dans la quantification de la restructuration

L'utilisation des réseaux sémantiques permet de déterminer des variables mathématiques (i.e., les métriques) quantifiant leur organisation. Ces métriques permettent de déterminer quels sont les nœuds ou les liens qui semblent les plus importants dans les réseaux selon différents critères (centralité, distance, connectivité, ...). Elles ont permis de capturer des différences d'organisation des réseaux en lien avec un événement (la résolution d'un problème ou non, étude 1A, 1B et 3) ou avec une période d'incubation (avec ou sans sommeil, étude 3). Ainsi, les variations de métriques de réseaux sémantiques constituent un outil de choix pour mesurer des changements dans l'organisation des réseaux et étudier leur lien avec des processus cognitifs ou des facteurs modulateurs.

Dans nos études, nous avons utilisé plusieurs métriques différentes (weight, SPL, efficiency, CC et EV). Nos résultats ne sont pas homogènes selon les métriques calculées. Par exemple, la résolution d'un problème analogue en condition spontanée était en rapport avec

des changements dans des métriques de lien alors qu'en condition dirigée, les changements dans des métriques de nœuds étaient plus pertinents (étude 1B). De la même manière, l'effet du sommeil paradoxal dans les différents types de restructuration a été également retrouvé avec des métriques différentes (étude 3). Les raisons pour lesquels certaines métriques semblent plus sensibles que d'autres pour capturer des changements relatifs à un processus sont encore incompréhensibles. L'utilisation des méthodes des réseaux dans la cognition étant encore récente, un travail plus fondamental doit être conduit pour comprendre ce que chaque métrique capture précisément à l'échelle des processus cognitifs. Il n'est pas exclu que l'hétérogénéité des résultats significatifs entre les métriques résulte de différences de distributions et de variations affectant la puissance statistique de chaque test. Une autre explication pourrait être en rapport avec la taille de nos réseaux sémantiques plus petites que les autres études ayant utilisé cette approche (entre 28 et 35 nœuds selon les études) (Benedek, Kenett, Umdasch, et al., 2017; Bernard et al., 2019; M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022; Yan et al., 2021). En raison du nombre limité de nœuds dans notre étude, le calcul des métriques et de leur variation pourrait être impacté différemment d'une métrique à une autre.

Pour construire nos réseaux, nous avons utilisé une méthode dans laquelle les liens entre les nœuds correspondent aux valeurs brutes des jugements d'associations de mots réalisés par les individus, aboutissant ainsi à des réseaux pondérés. Dans ce type de réseaux, tous les nœuds sont connectés entre eux. Cette méthode ne permet donc pas de déterminer si un lien nouveau se forme (ou disparaît) d'un réseau à un autre. La méthode de construction de réseaux non pondérés permet de conserver uniquement les liens entre les nœuds qui présentent une force d'association qui dépasse un certain seuil, les autres liens étant retirés. Dans nos études, nous avons choisi de construire des réseaux pondérés car décider d'un seuil pour conserver ou non un lien semblait arbitraire et variable d'un sujet à un autre. Cependant, l'utilisation de réseaux non pondérés permettrait de préciser la manière dont la restructuration se réalise. Par exemple, une restructuration pourrait être en rapport avec la rupture d'une fixation matérialisée par la disparition d'un lien fort mais non pertinent pour résoudre le problème, ou en rapport avec la création d'une nouvelle association pertinente pour résoudre le problème. Cette approche permettrait de valider plus directement la théorie de Schilling et al. (Schilling, 2005) en démontrant directement la formation d'un nouveau lien

entre deux communautés de nœuds dans le réseau créant ainsi un pont ou un raccourci entre des concepts ancrés dans des communautés distinctes. Une autre alternative intéressante à explorer serait de déterminer si certains nœuds changent de communauté (e.g., le nœud ciel passe de la communauté de nœuds associant l'idée de voler à celle associant l'idée de jeu dans l'énigme de Zoé). Nous n'avons pas utilisé cette approche ici en raison du faible nombre de nœuds dans le réseau limitant un calcul fiable de communauté.

Enfin, notre mesure de restructuration évalue un changement dans l'organisation des réseaux sémantiques entre deux points cruciaux dans la résolution d'un problème (avant sa présentation et après sa tentative de résolution). Cependant, elle ne renseigne pas sur ce qui se passe entre et en particulier quand et comment la restructuration a lieu. Les perspectives de perfectionnement de cet outil seraient d'affiner son caractère dynamique pour déterminer plus précisément les changements qui s'opèrent dans les réseaux en temps réel et comment ils aboutissent au réseau final restructuré obtenu dans notre étude. Une possibilité serait de répéter plusieurs fois les RJT pendant la période de réflexion au problème (**Figure 28**). Cela permettrait de décrire les étapes dans la restructuration du réseau. Par exemple, une association d'idée fixante (e.g., ciel et avion) peut être transitoirement rompue le temps d'en former une nouvelle pertinente pour l'objectif en cours (e.g., ciel et dessin). Dans notre situation, les paires fixantes restent globalement fortement associées car il n'y a pas de raison de ne plus associer ciel et avion par exemple (**Figure 28**). Une limite dans cette approche est probablement la répétition des RJT qui prendrait un temps considérable à faire (avec un risque non négligeable que les participants se lassent du fait de la répétition de l'exercice) mais également pourraient à termes influencer la résolution du problème. Répéter les RJT pendant le temps de réflexion pourrait également permettre de déterminer si la restructuration est un processus progressif qui s'étend tout au long de la réflexion conduisant à la résolution du problème ou au contraire très soudain juste avant de trouver la solution (à l'image du Eurêka). Il pourrait exister plusieurs profils de restructuration, rejoignant l'idée de différents mécanismes permettant le phénomène de restructuration.

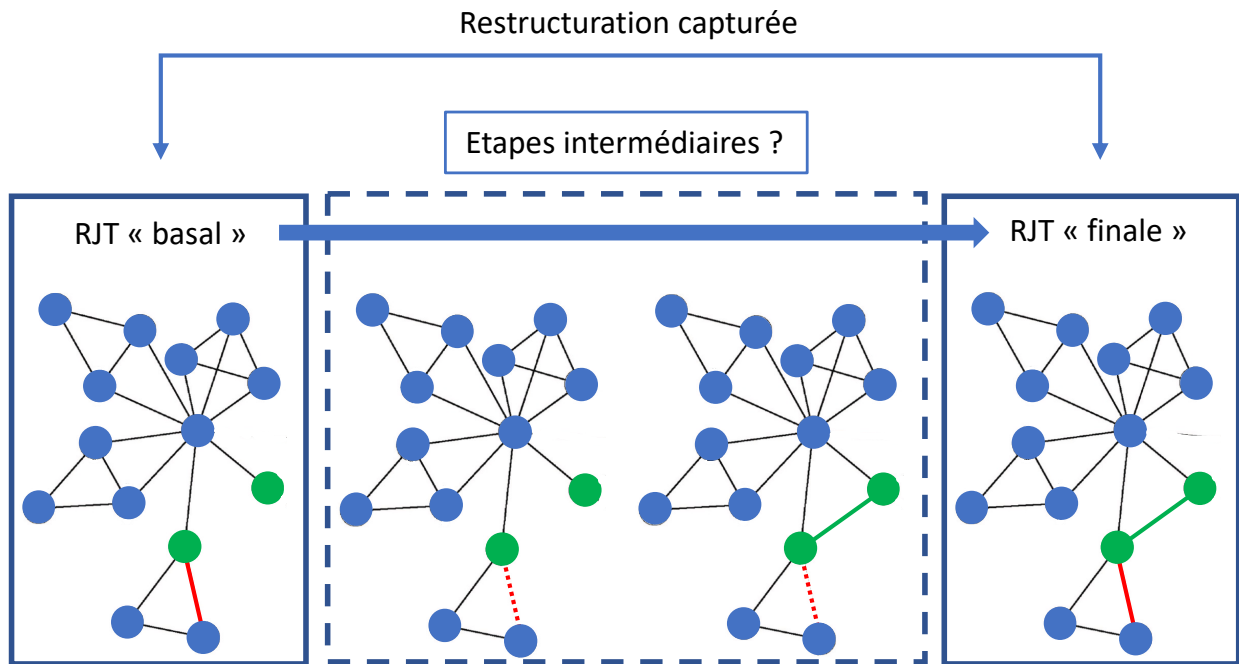


Figure 28. Mécanismes permettant la restructuration. Ici les nœuds verts représentent une association pertinente pour résoudre le problème (e.g., ciel et dessin) et le lien rouge une association fixante/trompeuse pour trouver la solution (e.g., ciel et voler). Dans notre approche, nous capturons l'organisation basale et finale des associations d'idées (réseaux à gauche et à droite, dans les rectangles en traits pleins). Ils ne renseignent pas sur les potentielles étapes intermédiaires permettant d'aboutir à ce changement (réseaux au centre, dans le rectangle en traits pointillés). En particulier, la formation de l'association pertinente pour résoudre le problème (lien vert) pourrait résulter d'une diminution transitoire de l'importance de la paire fixante/trompeuse (lien rouge en pointillés).

1.2 La restructuration dans la résolution de problèmes

Mécanisme ou marqueur ?

Dans notre étude 1A, nous avons observé une relation entre la restructuration (quantifiée par les réseaux sémantiques) et la résolution d'un problème. Cette relation implique des analyses statistiques ne permettant pas d'établir un lien causal entre les deux processus : est-ce le fait de trouver la solution qui induit une modification de jugements d'associations pendant la RJT ? Ou est-ce le fait de restructurer nos associations d'idées qui permet de trouver la solution ? La procédure expérimentale de notre étude ne nous permet pas de répondre directement à cette question. En l'absence d'argument direct, il faut rester

précautionneux sur l'interprétation et ne pas conclure à la causalité. En revanche, ce point peut être discuté à la lumière des résultats de nos études combinés à ceux de la littérature.

Dans le cas où la résolution de problèmes conduirait à modifier nos jugements dans les associations d'idées relatives au problème, les changements observés dans les réseaux sémantiques seraient considérés comme un marqueur de résolution de problèmes. En d'autres termes, notre méthode permettrait de capturer des changements d'états mentaux. Certaines études ont montré que les réseaux sémantiques étaient des systèmes dynamiques qui pouvaient être influencés par un contexte ou une expérience personnelle (Y. Kenett & Thompson-Schill, 2020; Yee & Thompson-Schill, 2016). Un des mécanismes qui pourrait être avancé est celui d'un amorçage sémantique enclenché par le fait de trouver la solution. Cet amorçage sémantique pourrait faciliter le jugement (quantitativement ou dans la vitesse de traitement) des paires de mots pertinentes pour résoudre le problème. Pour tester cette hypothèse, nous avons exploré dans l'étude 1A si la différence des temps de réponse (TR) pour juger les paires de mots entre la première et la deuxième RTJ ($\Delta TR = TR_{RT2} - TR_{RT1}$) était différente entre les solveurs et les non-solveurs (résultats additionnels). Cette analyse a montré que les TR étaient plus rapides dans la deuxième RTJ (comparativement à la première RTJ) chez les non-solveurs (comparativement au solveurs). Ce résultat va à l'encontre de l'hypothèse d'amorçage sémantique de la solution. De plus, il est à souligner que les participants n'avaient pas de retour sur la validité de leur réponse laissant toujours une incertitude sur le fait d'avoir la bonne réponse.

Dans le cas où, à l'inverse, la restructuration conduirait à la résolution du problème, la restructuration serait alors considérée comme un mécanisme de résolution de problèmes. Bien que cette question n'ait pas été adressée dans notre étude 1A, elle peut l'être en partie dans notre étude 1B. Dans cette étude, nous avons montré que la restructuration relative à un problème était associée à la résolution d'un problème analogue. Les deux problèmes utilisés présentaient une relation analogique mais aucun lien sémantique dans leurs énoncés ou réponses. De plus, la construction des réseaux sémantiques utilisait une liste de mots spécifiques à une énigme (et donc sans rapport avec son analogue). Enfin, l'effet de la restructuration de ces réseaux sémantiques a été évalué dans un deuxième temps par la tentative de résolution d'un problème analogue. Cette dissociation tant sémantique du

matériel que temporelle suggère que la restructuration précède et facilite la résolution de problèmes (au moins analogues). Du moins, il ne peut pas être objecté que la solution du problème analogue pouvait amorcer les associations d'idées en lien avec la solution de ce problème. L'étude de Durso et al. (Durso et al., 1994) apporte aussi des arguments en faveur de l'idée que la restructuration vient avant la résolution du problème. Dans cette étude, une restructuration n'était observée uniquement chez les individus qui avaient trouvé la solution eux-mêmes et pas chez ceux à qui la solution était donnée avant la construction des réseaux. En effet, l'organisation des réseaux sémantiques chez les individus à qui les auteurs avaient donné la solution présentait plus de similarités avec celui des non-solveurs (qui n'ont pas eu la solution) que celui des solveurs (qui ont trouvé la solution par eux-mêmes). De plus, les auteurs ont pu montrer que la centralité des mots aidants dans le réseau des solveurs était progressive pendant le temps de réflexion précédant le moment où ils trouvent la solution. Ces résultats sont des arguments supplémentaires forts en faveur de l'hypothèse du rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes.

Pour conforter ces arguments qui visent à décrire la restructuration comme un mécanisme de résolution de problèmes, d'autres études peuvent être imaginées afin d'établir un lien causal. Une solution simple serait de reproduire le paradigme de Durso et al. (Durso et al., 1994) adapté à notre approche (i.e., en évaluant un changement). Cela permettrait de déterminer si la restructuration des réseaux sémantiques varie selon que le participant trouve seul la solution, ne trouve pas la solution ou obtient la solution par quelqu'un d'autre.

La restructuration dans le transfert par analogie

Dans l'étude 1B, nous avons souligné l'importance du transfert par analogie dans la résolution de problèmes. En effet, nous avons montré que résoudre un problème qui était précédé d'un problème présentant un schéma d'analogie commun était facilité comparativement à une situation où le problème était présenté seul. Ces résultats permettent de répliquer les études antérieures ayant montré le lien entre le transfert par analogie et la résolution de problèmes (Barnett & Ceci, 2002; Cushen & Wiley, 2018; George & Wiley, 2018; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974) et d'étendre ce lien à de nouveaux matériels (verbal et visuospatial). Notamment, notre nouvelle tâche (SATT) offre la possibilité de

mesurer les capacités de transfert par analogie de manière plus fine (courbe d'apprentissage, utilisation des TR) mais également à l'échelle de l'individu. De façon plus globale, ces résultats permettent de confirmer que notre matériel et schéma expérimental capturent bien un effet de transfert par analogie, permettant une interprétation pertinente des résultats additionnels de cette étude.

En effet, nous avons démontré un lien entre restructuration et résolution de problèmes analogues. En plus d'argumenter la discussion sur la causalité du lien entre restructuration et résolution de problèmes, ce résultat permet de souligner le rôle mécanistique de la restructuration dans le transfert par analogie en montrant que plus les réseaux sémantiques se réorganisaient vers une représentation pertinente pour la solution à un problème initial, plus la probabilité de résoudre un problème analogue augmentait. A l'échelle du raisonnement par analogie, ce résultat est une avancée considérable dans la compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans le transfert par analogie. Comme discuté précédemment, ce résultat indique un rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes. En effet, étant donné la complète indépendance à la fois du matériel (aucune similarité sémantique de l'énigme initiale et des mots de la RJT ayant pu amorcer la réponse de l'énigme analogue) et temporelle (évaluation des paires de mots de la RJT avant connaissance de l'énigme analogue à résoudre), les limitations évoquées dans l'étude 1A sont dépassées. Nos résultats sont en accord avec les études qui ont mis en avant l'importance de la représentation du problème initial dans le transfert par analogie (Cushen & Wiley, 2018; Gamo et al., 2010; Gros et al., 2015; Kurtz & Loewenstein, 2007; Sander & Richard, 2005; Silliman & Kurtz, 2019). Une hypothèse que l'on peut formuler serait que le changement de la représentation d'un problème vers une représentation pertinente pour le résoudre permet d'intégrer et rendre abstrait de nouvelles informations pertinentes à l'origine de la création d'un schéma analogique. Cette représentation restructurée plus abstraite faciliterait ainsi la génération d'une règle générale et son application lors de la confrontation au problème analogue. Le lien entre restructuration telle que nous la mesurons et l'abstraction du schéma analogique reste cependant à établir et les mécanismes impliqués à comprendre.

Ce lien mécanistique entre restructuration du problème initial et résolution de problèmes analogues était en partie dépendant du statut solveur ou non-solveur des participants à l'énigme initial. Nous avons vu dans l'étude 1A que la restructuration relative à un problème était en rapport avec sa résolution, comme en témoigne d'autres études (Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994). De plus, même si le rôle mécanistique de la restructuration dans cette relation n'est pas établi, il a été montré que ces changements représentationnels s'opéraient avant la résolution du problème (Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020; Durso et al., 1994), qu'ils ne s'opéraient pas chez les non-solveurs (Durso et al., 1994) ou si la solution était donnée aux participants (Durso et al., 1994). Il semble donc intuitivement plausible que les solveurs de l'énigme initiale (qui présente le plus de changement) prennent une place importante dans la prédiction de la résolution du problème analogue. En raison du faible nombre de solveurs aux problèmes initiaux, nous n'avons pas pu explorer directement s'il existait une différence de l'effet de la restructuration du problème initial dans la résolution d'un problème analogue selon que les sujets aient trouvé par eux-mêmes la solution à l'énigme initiale. Cependant, il est à souligner que certains résultats persistaient lorsque les solveurs de l'énigme initiale étaient retirés des analyses. Cela suggère que même si le participant ne trouvait pas la solution à l'énigme initiale, des processus de restructuration s'opéraient de manière plus ou moins importante avec une variabilité suffisamment importante pour prédire la résolution du problème analogue.

Un autre résultat nouveau est celui du lien entre résolution du problème analogue et résolution avec insight évaluée par le rapport d'un Eurêka. Ce résultat va dans le sens des auteurs avançant le Eurêka comme un phénomène étant souvent en lien avec le raisonnement par analogie et le transfert (Antonietti & Balconi, 2010; George & Wiley, 2018). Ce point est intéressant à deux niveaux différents. D'abord parce qu'il permet d'alimenter la question du lien existant entre créativité et raisonnement par analogie (Green, 2016; Green et al., 2010, 2012, 2017; Holyoak et al., 1995; Yang et al., 2022), en raison des connexions étroites entre la résolution avec insight et les capacités de créativité (Dietrich, 2004; Kounios & Beeman, 2014). Ensuite, parce que certains auteurs tendent à associer restructuration et résolution avec insight (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999; MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005) renforçant indirectement la place de la restructuration dans le transfert par analogie. Cependant l'implication de processus de restructuration dans la résolution avec insight est un

point remis en question par d'autres auteurs (Becker, Wiedemann, et al., 2020; Becker et al., 2021; Cushen & Wiley, 2012), qui ont présenté des arguments permettant de dissocier ces deux processus¹². Des analyses complémentaires pourraient explorer si la restructuration du problème initial des solveurs avec insight permet de prédire la résolution du problème analogue. Ou encore si la restructuration du problème initial permet de prédire la résolution avec insight du problème analogue.

Au-delà de la question du lien entre résolution avec insight et phénomène de restructuration, la signification du Eurêka dans la résolution d'un problème analogue n'est pas évidente. Il est possible que le Eurêka reflète une forme de restructuration ciblée sur le problème analogue (non évalué dans notre étude) à l'image de la restructuration qui s'opère dans la résolution de problèmes dans notre étude 1A. Mais il pourrait également refléter le moment où l'alignement (favorable) des problèmes initial et analogue se réalisent et que les similarités structurelles sont visualisées par l'individu. Ce processus pourrait être rapproché d'un insight extrinsèque correspondant à cette expérience subjective proche du Eurêka lorsque la solution à un problème difficile est donnée (« Ah oui ! ») (Rothmaler et al., 2017). La question de la signification du Eurêka dans le raisonnement par analogie est intéressante car elle remet en question ce que capture réellement le phénomène de Eurêka, en particulier d'une tâche à une autre.

Spécificité et généralisation de l'effet

La spécificité du lien entre la restructuration et la résolution de problèmes est un point discutable. Contrairement à d'autres études ayant exploré les processus de restructuration dans la résolution de problèmes (Cushen & Wiley, 2012; Danek et al., 2020), nous avons comparé l'effet de restructuration chez les individus qui ont trouvé la solution au problème versus ceux qui ne l'ont pas trouvé. En revanche, dans notre étude, nous n'avons pas utilisé de problème « contrôle » qui n'implique pas de restructuration lors de sa résolution. Ce type de problème pourrait correspondre à un problème dans lequel l'énoncé serait suffisamment élaboré pour permettre une représentation initiale du problème correct (un « well-defined problem », en opposition à un « ill-defined problem »). Par exemple, prenons ce problème :

¹² Cette question fait l'objet d'un paragraphe spécifique dans la troisième partie de cette discussion.

« *Jeanne est une élève d'école primaire. Elle s'amuse pendant la récréation à jeter un caillou qui atterrit dans le ciel. Comment est-ce possible et dans quel contexte ?* ». Ce problème présente la même solution que le problème de Zoé, mais son énoncé est suffisamment détaillé pour permettre une représentation initiale d'emblée en rapport avec la solution.

Les résultats de l'étude 1A présentent certaines limites statistiques, en particulier en raison du faible taux de résolution des énigmes, déséquilibrant considérablement les effectifs de nos deux groupes (solveurs et non-solveurs). Ce déséquilibre peut exercer une influence sur les modèles statistiques et remettre en question l'effet qui pourrait se produire sur seulement les quelques solveurs inclus dans l'analyse (et résulterait alors du hasard). Cependant la réplicabilité de ce résultat à trois populations différentes (deux échantillons indépendants dans l'étude 1A et un échantillon dans l'étude 3) permet d'affirmer une certaine robustesse de nos résultats. De plus, les modèles statistiques présentent une bonne capacité à déterminer la résolution du problème ou non sur la base de la quantification de la restructuration en corrigeant pour ce design déséquilibré (forte valeur de *balanced accuracy* sur le premier échantillon).

Tous ces éléments assurent la robustesse de nos résultats et la fiabilité de nos interprétations. Cependant, il faut souligner que nos études établissant le lien entre restructuration et résolution de problèmes utilisent un matériel verbal sous la forme d'énigmes. Bien que nous ayons observé que nos résultats étaient généralisables à différents problèmes de ce type, la question de la généralisation de cet effet à d'autres matériels reste ouverte. D'autres études restent encore nécessaires pour établir ce lien avec d'autres type de problèmes. Cependant, la nature sémantique verbale des réseaux limite l'utilisation d'un matériel figural et l'application des réseaux sémantiques à d'autres problèmes classiquement associés à un phénomène de restructuration restent un défi, que nous tentons de relever plus loin dans ce chapitre.

Partie 2

Le sommeil comme modulateur de la restructuration

Sommaire	p.
2.1 Le sommeil paradoxal, un inducteur de restructuration	316
La restructuration mesurée par les réseaux sémantiques	
La restructuration à travers les rêves	
2.2 Dissociation de l'effet du sommeil paradoxal sur la restructuration et la résolution de problèmes	320
2.3 Place du sommeil dans le transfert par analogie	324
2.4 L'endormissement, miroir du sommeil paradoxal ?	325
Le sommeil paradoxal, un stade difficile à étudier	
L'hypothèse alternative du N1	

Nous avons vu que la restructuration est un processus en lien avec la résolution de problèmes par le développement d'une nouvelle méthode utilisant les réseaux sémantiques. L'utilisation de cet outil offre l'opportunité d'étudier les facteurs qui peuvent moduler la restructuration et la résolution de problèmes créatifs et analogues. En effet, trouver et comprendre les facteurs qui peuvent moduler ces processus semblent pertinents.

Dans notre travail, nous nous sommes particulièrement intéressés au rôle du sommeil dans la restructuration et la résolution de problèmes, du fait de modèles théoriques permettant de poser des hypothèses sur ces mécanismes d'action. De plus, le sommeil étant indispensable à l'homme, comprendre son rôle dans la restructuration et la résolution de problèmes peut conduire à des applications pratiques considérables tant sur le plan individuel que pour la société. Ainsi, dans cette partie, nous discutons principalement des résultats de l'étude 3.

2.1 Le sommeil paradoxal, un inducteur de restructuration

La restructuration mesurée par les réseaux sémantiques

L'approche utilisée dans l'étude 3 est innovante du fait de la distinction faite entre les processus de restructuration et ceux de résolution de problèmes. Cette distinction permet de rompre le raisonnement circulaire des études antérieures ayant adressé les questions du rôle du sommeil dans la restructuration des associations sémantiques (e.g., hyper-associativité en sommeil paradoxal) et la résolution de problèmes. Cette approche est rendue possible par le développement de notre nouvelle méthode permettant de quantifier directement la restructuration par les changements qui s'opèrent dans l'organisation des réseaux sémantiques. Ainsi, nous avons pu montrer pour la première fois que le sommeil paradoxal était associé à une plus grande restructuration de nos associations d'idées relatives à un problème, indiquant son lien avec un état mental d'hyper-associativité facilitant les associations d'idées. Ce résultat supporte les hypothèses des modèles théoriques (Deperrois et al., 2022; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021) et les quelques études expérimentales qui suggèrent que le sommeil paradoxal facilite la formation d'associations d'idées distantes (Cai et al., 2009; Lacaux et al., 2019) ou permet l'association de concepts faiblement associés en mémoire (Carr & Nielsen, 2015; Stickgold et al., 1999). En particulier, notre étude est en accord avec celle de Stickgold et al. (Stickgold et al., 1999) qui constitue une référence dans le domaine. Dans cette étude utilisant un schéma expérimental d'amorçage sémantique, les auteurs ont montré que le sommeil paradoxal était associé à un état mental facilitant l'association de mots sémantiquement distants et limitant celle de mots sémantiquement proches. L'utilisation des réseaux sémantiques dans notre étude permet d'étendre ces résultats en les intégrant dans un espace sémantique plus complexe (i.e., les réseaux sémantiques) permettant de mieux percevoir la signification de cette hyper-associativité appliquée à un contexte scientifique plus large (i.e., la résolution de problèmes). Cela permet d'approfondir la compréhension de certains mécanismes et d'ouvrir sur des potentielles perspectives d'applications pratiques. De plus, l'effet observé dans notre étude n'est pas induit par un phénomène de *carry-over* car les participants n'étaient pas directement testés après un réveil en sommeil paradoxal. Cela suggère une durabilité dans le temps de la restructuration observée dans notre étude, à l'inverse de l'étude de Stickgold et

al. où l'effet s'annule à distance de la sieste. Enfin, notre étude est la première à confirmer cette étude princeps dans le domaine en utilisant un matériel différent.

Nos résultats ont également montré que le sommeil paradoxal était responsable d'une restructuration locale contextualisée au problème à résoudre. Cette restructuration locale revêtait deux aspects différents. D'abord, le sommeil paradoxal permettait de réduire les associations d'idées relatives à la représentation dominante du problème qui n'était pas pertinente pour le résoudre. Ce résultat rejoint celui de Stickgold et al. (Stickgold et al., 1999) montrant que le sommeil paradoxal facilitait l'inhibition d'associations d'idées évidentes. Ainsi, cette première restructuration orientée pourrait faciliter l'émergence de représentations alternatives du problème. Ensuite, le sommeil paradoxal permettait de renforcer les associations d'idées pertinentes pour résoudre le problème. Grâce à nos résultats précédents (étude 1A), cette deuxième restructuration permettrait un changement de représentation du problème vers une représentation associée à la résolution du problème.

La restructuration à travers les rêves

L'étude des rêves est une approche intéressante pour étudier nos questions scientifiques en rapport avec la résolution de problèmes créatifs. En effet, il a été rapporté que les individus qui ont des facilités à rapporter et décrire leurs rêves présentaient un profil de créativité plus grand (Vallat et al., 2022). En analysant la question à l'échelle mécanistique, il serait intéressant d'étudier comment un rêve donné (rapporté par un grand rêveur ou pas) pourrait être en lien avec les processus de restructuration. Dans cette idée, Deperrois et al. (Deperrois et al., 2022) ont développé un modèle théorique proposant un mécanisme par lequel les rêves pourraient intervenir dans la restructuration. Dans ce modèle exclusivement computationnel (sans démonstration expérimentale), les rêves survenant pendant le sommeil lent ou paradoxal prennent des rôles différents (respectivement de consolidation et transformation mnésique) rejoignant les idées avancées par les autres modèles théoriques plus centrés sur des arguments électrophysiologiques. De manière plus concrète, Malinowski et al. (Malinowski & Horton, 2021) ont développé un questionnaire permettant d'évaluer l'hyper-associativité des rêves à partir de trois composantes (le sentiment de bizarrerie, la combinaison d'événements appartenant à des moments de vie différents et le caractère

métaphorique du rêve par rapport à notre vie présente). Dans notre étude, nous avons recueilli le vécu onirique pendant le sommeil au cours d'entretiens enregistrés. Ces entretiens étaient complétés par la réalisation du questionnaire d'hyper-associativité des rêves (Malinowski & Horton, 2021). Ces données n'ont pas encore fait l'objet d'analyses spécifiques. L'hyper-associativité des rêves capturée par le questionnaire mais également par une analyse qualitative des entretiens (e.g., par décodage automatique du discours pour déterminer l'originalité et la distance des idées exprimées) pourraient être confrontées à la mesure de la restructuration par les réseaux sémantiques. Cela permettrait d'établir un pont entre rêve et restructuration, permettant de situer le phénomène de restructuration pendant le sommeil avant la solution et non pendant la réflexion au problème ou la réalisation de la deuxième RJT.

En revanche, s'il est possible de faire un lien entre le niveau d'hyper-associativité d'un rêve et la restructuration, savoir si le rêve survient dans un stade ou un autre est plus difficile. Il est classique de mettre en opposition les rêves selon la nature du stade dans lesquels ils sont produits. Classiquement, les rêves en sommeil paradoxal sont plus intenses émotionnellement, étranges, longs, hallucinatoires et discontinues (Antrobus, 1983; Casagrande et al., 1990; Foulkes, 1964; Hobson, 1997; Hobson & Stickgold, 1994; Malinowski & Horton, 2021; Mamelak & Hobson, 1989; Rittenhouse et al., 1994; Wamsley et al., 2010; Wamsley & Stickgold, 2010; Zadra et al., 1998). Les entretiens dans notre étude ont retrouvé que certains rêves de participants ayant fait du sommeil paradoxal présentaient certaines de ces caractéristiques comme une émotion intense (« *Cauchemar avec une voix bizarre et angoissante dans une pièce, je sonnais pour l'appeler, quelqu'un arrivait avec une grosse peluche angoissante qui lui courrait après* »), la présence d'hallucination (« *J'ai rêvé que j'étais sur Instagram, je voyais les photos de vacances d'une amie, puis j'étais attirée par mon téléphone et je me retrouvais dans ses vacances avec elle* ») ou l'enchaînement de situations incongrues et discontinues (« *J'ai rêvé qu'il y avait un rassemblement (type camping ou festival), j'étais entourée de gens, au bord d'un fleuve. Des gens étaient sur un bateau imaginaire, qui n'existait pas, ils allaient à fond sur l'eau. Je devais aller à une soirée, je passais chez un ami, qui était absent. Un cambriolage a eu lieu, j'ai pris le chien et je suis partie avec* »). Bien que ces participants aient fait du sommeil paradoxal pendant leur sieste, notre protocole expérimental (non centré sur l'étude des rêves) ne nous permet pas de déterminer le moment exact où se sont formés ces rêves.

Enfin, les rêves pourraient également constituer un espace dans lequel la résolution du problème est facilitée. Dans notre étude, quelques participants rapportent avoir rêvé de l'énigme :

« Vous êtes venu dans la pièce pour me dire que c'était fini et vous aviez un gâteau dans les mains et vous m'avez dit de me dépêcher. Ce rêve s'est répété mais je savais que je rêvais. Vous étiez avec un journaliste et je lui ai demandé la réponse à l'énigme. Il m'a dit que Zoé était dans l'ISS [Station spatiale internationale], j'ai explosé de rire. »

« J'ai rêvé de l'énigme, il y avait un caillou dans les airs. »

« J'ai rêvé de l'énigme, la mère de Zoé les conduisait jusqu'à un lac et Zoé jetait le caillou dans le lac bleu, mais je ne pense pas que ce soit une bonne réponse. »

Dans ces trois rêves, Zoé ou son caillou sont évoqués dans une situation faisant référence à une réponse (fausse) souvent proposées par les participants (l'idée de voler et être dans l'espace, celle que le caillou vole, ou encore que le caillou soit dans un lac qui reflète le ciel). Il pourrait être intéressant de déterminer si ces rêves exercent une influence sur l'organisation des associations d'idées. Par exemple, évaluer si l'idée de gravité serait très centrale dans le réseau sémantique du participant ayant rêvé de la station spatiale internationale. Une hypothèse amusante serait de demander à des rêveurs lucides de résoudre notre énigme. Au cours d'un rêve lucide, les individus sont conscients de rêver et dispose de leur libre arbitre et d'une faculté de raisonnement (Baird et al., 2019). Il a été montré que des rêveurs lucides étaient capable de reproduire un code prédéfini (e.g., enchainement de mouvements oculaires ou contractures séquentielles de muscles du visage) lors d'un rêve lucide (Konkoly et al., 2021). Ainsi, un rêveur lucide pourrait se rappeler de l'énigme pendant son rêve afin d'évaluer si évoquer un problème pendant un rêve peut faciliter sa résolution.

2.2 Dissociation de l'effet du sommeil paradoxal sur la restructuration et la résolution de problèmes

Nous n'avons pas retrouvé de lien significatif entre le taux de résolution de l'énigme et la nature de l'incubation (sans sommeil, avec sommeil paradoxal, avec sommeil mais sans sommeil paradoxal). Plus précisément, ce résultat avance qu'il n'y a pas plus de solveurs dans le groupe sommeil paradoxal comparativement aux autres groupes. Pourtant, le sommeil paradoxal était associé dans notre étude à un plus grand processus de restructuration à la fois globale (renforçant toutes les associations d'idées) mais également locale (renforçant en particulier les associations d'idées qui ne sont pas en rapport avec la représentation dominante du problème et qui sont en rapport avec la solution). La discussion de cette dissociation fait l'objet de ce paragraphe.

La première possibilité pour expliquer l'absence de résultats serait de conclure à une absence d'effet du sommeil sur la résolution de problèmes. Cependant conclure à un résultat négatif en l'absence de résultats significatifs est délicat. Quelques études ont mis en avant cette conclusion en l'argumentant par l'utilisation de modèle Bayésien ou de calcul de puissance rigoureux (Brodt et al., 2018; Schönauer et al., 2018). Autrement, d'autres facteurs confondants pourraient rendre compte de ce non-résultat. Par exemple, il pourrait résulter d'un effet d'inertie du sommeil (Dinges, 1990), correspondant à l'état de transition entre le sommeil et l'éveil, associé à des réductions de performances cognitives (Vallat et al., 2019). Dans notre étude, les tâches expérimentales réalisées étaient longues et débutées après un temps libre de plusieurs minutes et l'entretien post incubation recueillant le contenu onirique pendant le sommeil. Ainsi, il est peu probable que l'inertie ait négativement impacté les performances de résolution de problèmes. Enfin ce non-résultat pose la question plus critique du groupe contrôle. Dans ce groupe, les participants ont réalisé un puzzle pendant l'incubation. Nous avons choisi de leur faire réaliser une même activité afin de les rendre homogènes et comparables mais également d'occuper leur esprit sur une tâche simple pour à la fois limiter la somnolence (contrôlée par la polysomnographie) et ne pas induire une surcharge cognitive trop importante. D'autres modalités d'incubation pourraient être testées. De plus, il est difficile de contrôler si d'autres mécanismes de résolution de problèmes sont utilisés chez les participants qui ne dorment pas comparativement aux participants qui

dorment. Pour étudier spécifiquement si l'effet du sommeil sur la restructuration permet de faciliter la résolution de problèmes, une analyse intégrant tous les paramètres doit être réalisée (et non des analyses faisant des liens deux à deux). Nous n'avons pas pu répondre à cette question en raison d'un taux de résolution de l'énigme après l'incubation trop faible, laissant cette hypothèse pour le moment sans réponse.

Dans les études ayant montré un effet marqué du sommeil dans la résolution de problèmes, la solution était souvent présentée au participant avant la phase de sommeil, soit de manière cachée (Lacaux et al., 2021; Wagner et al., 2004), soit de manière implicite dans une tâche sans rapport (Cai et al., 2009). Dans notre schéma expérimental, la RJT pourrait jouer le rôle d'amorce de la solution puisqu'elle présente les paires pertinentes pour résoudre le problème aux participants avant l'incubation. Cependant, ces paires aidantes ne contiennent pas directement la solution contrairement aux études précédentes (Cai et al., 2009; Lacaux et al., 2021; Wagner et al., 2004). De plus, les paires aidantes dans la RJT peuvent être noyées au sein des 190 paires jugées (en témoigne les rares cas de participant trouvant la solution après la deuxième RJT). Répéter l'exposition de la RJT pourrait faciliter l'extraction des informations restructurées relatives aux paires aidantes (Lacaux et al., 2021). Cependant, il est à noter que dans notre étude (comparativement aux précédentes supportant l'importance d'une préexposition de la solution dans l'effet positif du sommeil dans la résolution de problèmes), les participants étaient aussi exposés à des paires de mots trompeuses. Aucune n'étude n'a exploré l'effet d'une amorce trompeuse dans l'effet du sommeil sur la résolution de problèmes. Dans notre étude, nous montrons que même après une préexposition à des paires fixantes ou trompeuses, l'effet du sommeil paradoxal tend à modifier les associations selon un gradient déterminé par la pertinence de chaque mot ou paires de mots pour résoudre le problème. Il n'est pas exclu que mélanger des amorces aidantes et trompeuses ait pu impacter la restructuration et la résolution du problème. Il pourrait être intéressant de tester l'effet du sommeil paradoxal sur la résolution du problème lorsqu'uniquement les paires aidantes ou uniquement les paires fixantes sont présentées avant l'incubation. Cela renvoie à la question plus générale et non résolue des mécanismes de sélectivité de cette restructuration induite par le sommeil paradoxal.

Un dernier élément peut être discuté. Il correspond à l'idée que l'effet positif du sommeil paradoxal sur la restructuration n'était pas suffisant pour conduire à la solution. Cette observation soulève deux hypothèses. D'abord, il est peut-être nécessaire de dépasser un certain seuil de changement pour rendre une association d'idées pertinente suffisamment saillante ou au contraire rendre une association d'idées trompeuse suffisamment « éteinte » pour conduire à la solution. De manière plus complexe, la résolution du problème peut être en lien avec une combinaison de changements critiques à atteindre pour trouver la solution, suggérant alors une organisation de réseau « type » associée à la résolution du problème. Pour tester cette hypothèse, les données des deux échantillons de l'étude 1A pourraient aider à déterminer ces seuils de changements associés à la résolution du problème. Le second point concerne l'effet de restructuration globale associé au sommeil paradoxal. Cette restructuration globale sous-entend que toutes les associations d'idées relatives au problème (aidantes comme trompeuses) sont renforcées. Il est à noter que cet effet global de restructuration sur la résolution du problème n'était pas retrouvé dans l'étude 1. Même si nos analyses montrent qu'il existe malgré tout un gradient dans cet effet de restructuration (plus important dans les paires pertinentes pour résoudre le problème notamment), cet effet de restructuration globale peut avoir contre balancé l'effet de restructuration orientée vers la solution. Ce point ouvre la question du rôle complémentaire du sommeil paradoxal et lent dans les processus de restructuration et de résolution de problèmes.

Les études théoriques et expérimentales tendent à dissocier le rôle du sommeil lent (plus globalement associé à la consolidation en mémoire) de celui du sommeil paradoxal (associé à des processus de transformation et combinaison mnésiques) (Deperrois et al., 2022; Feld & Diekelmann, 2015; Giuditta, 2014; Landmann et al., 2014; Lewis et al., 2018; Lewis & Durrant, 2011; Llewellyn & Hobson, 2015; Paller et al., 2021; Rasch & Born, 2013). Cependant, le sommeil s'organise en une récurrence de cycles dans lesquels sommeil lent et paradoxal s'alternent. Il paraît donc intuitif d'avancer que cette organisation physiologique a une signification cognitive. Plusieurs modèles théoriques mettent en avant le caractère complémentaire de ces caractéristiques (Deperrois et al., 2022; Giuditta, 2014; Lewis et al., 2018). Appliqué à la restructuration, il pourrait être avancé que c'est le rôle du sommeil dans sa globalité qui permette la résolution de problèmes. Une hypothèse spéculative serait la suivante (**Figure 29**) : par un état mental d'hyper-associativité, le sommeil paradoxal permet

la restructuration aboutissant à la création/renforcement de l'ensemble des associations d'idées relative au problème (aidantes comme trompeuses). Cependant, compte tenu d'un effet de restructuration orientée vers la solution, cette hyper-associativité apparaît asymétrique avec un renforcement plus important des paires de mots aidantes comparativement aux paires de mots fixantes. Le rôle du sommeil lent pourrait être de consolider les paires aidantes pour résoudre le problème. En l'absence de consolidation, les paires fixantes pourraient être atténuées ou oubliées. La succession de sommeil lent et paradoxal au cours d'une nuit complète pourrait permettre de stabiliser de nouvelles associations d'idées résultantes de restructurations itératives et les rendre plus saillantes. Notre étude à l'échelle d'une sieste permet uniquement de répondre à la question du rôle du sommeil paradoxal dans la restructuration et la résolution de problèmes. Des études sur une nuit entière pourraient répondre plus précisément à la question de l'importance des séquences sommeil paradoxal – sommeil lent dans la résolution de problèmes. Cette hypothèse permettrait de réconcilier une partie de la littérature sur l'effet du sommeil dans la résolution de problèmes. En particulier, les deux études ayant montré des liens entre le sommeil lent et la résolution de problèmes ont utilisé des périodes de sommeil incluant une nuit entière (Beijamini et al., 2014, 2021; Sanders et al., 2019). Il n'est pas exclu dans ces études que l'association du sommeil paradoxal au sommeil lent (systématique dans les études étudiant le sommeil paradoxal) ait participé à l'effet positif du sommeil lent dans la résolution de problèmes.

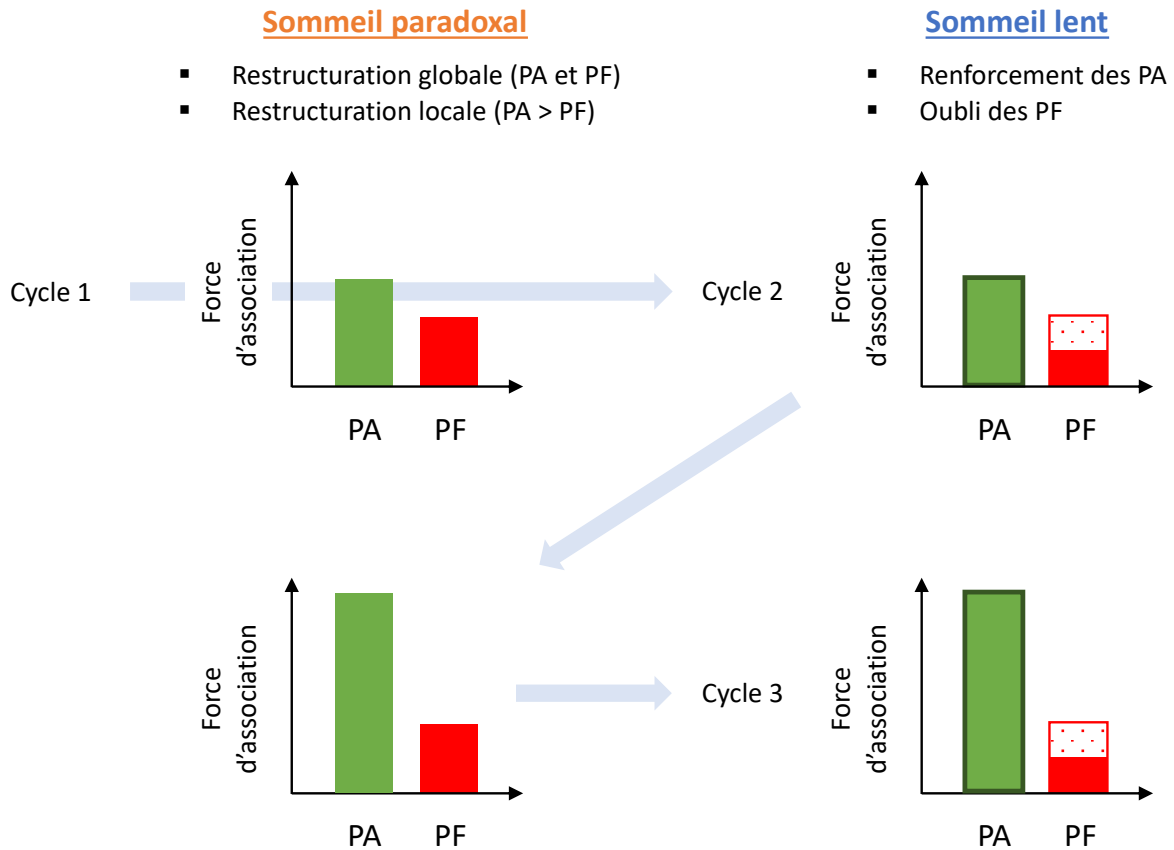


Figure 29. Hypothèse pour une vision plus globale du sommeil dans la restructuration et la résolution de problèmes. Lors du premier cycle, le sommeil paradoxal permet une restructuration globale mais asymétrique en faveur des paires aidantes (PA, en vert) comparativement aux paires fixantes (PF, en rouge). Au cycle suivant, le sommeil lent permet une consolidation des PA (contours verts épais) et un oubli des PF non consolidées (rectangles rouges avec points). Les cycles se poursuivent au cours de la nuit, l'écart entre l'associativité des PA et des PF se creuse progressivement aboutissant à rendre plus saillant les PA.

2.3 Place du sommeil dans le transfert par analogie

Dans ce travail de thèse, des données visant à explorer le rôle du sommeil dans le transfert par analogie ont été récoltées dans l'étude 3 mais n'ont pas encore fait l'objet d'analyses concrètes. Dans le protocole expérimental, après avoir tenté de résoudre l'énigme de Zoé après la période d'incubation, la solution à l'énigme était présentée aux participants. Après une tâche intercurrente, l'énigme analogue de celle de Zoé (l'énigme de la Voiture) était proposée aux participants. De plus, les participants ont réalisé la SATT avec la première session (comportant la condition *apprentissage*, i.e., où un schéma analogique était appris) avant l'incubation et la deuxième session (comportant la condition *transfert*, i.e., où le schéma

appris doit être appliqué dans un nouveau domaine) après l'incubation. Ainsi, en utilisant la SATT, il sera possible d'évaluer si le sommeil permet de renforcer l'apprentissage d'un schéma d'analogie, facilitant ainsi son application dans un domaine nouveau par rapport aux sujets contrôle qui ne dorment pas. De plus, il sera possible d'évaluer l'effet du sommeil sur la restructuration du problème initial dans la résolution du problème analogue.

Les hypothèses concernant l'effet du sommeil sur le transfert par analogie sont ouvertes, en particulier du fait de nos résultats précédents. En particulier, le transfert par analogie pourrait être facilité par la consolidation mnésique qui s'opère pendant le sommeil lent. D'après le modèle de Lewis et al. (Lewis et al., 2018), cet effet de consolidation pourrait permettre l'abstraction d'un schéma général en consolidant les traces mnésiques qui présentent le plus de zones de chevauchement entre elles. Les autres informations non consolidées sont perdues et les informations consolidées permettent de générer un schéma général. Dans le contexte d'une relation analogique, ce schéma peut correspondre à un schéma d'analogie qui permettra de réaliser le transfert dans un second temps. En parallèle, nos résultats ont permis d'identifier la restructuration comme un mécanisme dans le transfert par analogie. Compte tenu d'un effet facilitateur du sommeil paradoxal sur la restructuration, le sommeil paradoxal pourrait également impacter le transfert par analogie via son effet sur la restructuration. Ainsi, nos résultats antérieurs et les données théoriques relatives au sommeil, nous permettent d'établir des hypothèses pour orienter nos prochaines analyses sur la place du sommeil dans le transfert par analogie.

2.4 L'endormissement, miroir du sommeil paradoxal ?

Le sommeil paradoxal, un stade difficile à étudier

Nous avons focalisé notre étude 3 sur l'effet du sommeil paradoxal sur les processus de restructuration et de résolution de problèmes. Cette hypothèse était proposée par plusieurs modèles théoriques et encouragée par quelques résultats expérimentaux. Cependant, le sommeil paradoxal n'est pas un stade facile à étudier principalement car il n'est pas physiologique d'obtenir un temps de sommeil exclusivement composé de sommeil paradoxal. La narcolepsie est une situation physiopathologique particulière où les transitions entre éveil et sommeil paradoxal sont facilitées. Il est fréquent d'observer des

endormissements en sommeil paradoxal (ou du moins avec une transition rapide) dans les nuits ou les siestes de ces patients. L'étude de leur sommeil permettrait potentiellement de limiter la présence de sommeil lent avant l'apparition du sommeil paradoxal et de se rapprocher d'un effet « pur » du sommeil paradoxal. Cette population pourrait donc être d'un intérêt majeur dans nos questions scientifiques en constituant par exemple un groupe spécifique dans notre étude. Il est cependant à noter que ces patients présentent un potentiel de créativité supérieur à une population contrôle, probablement en rapport avec les caractéristiques de leur sommeil facilitant les associations d'idées (Lacaux et al., 2019). Il est donc important dans ce type d'approche de considérer un groupe comprenant des patients narcoleptiques qui ne réalisent pas de sieste pour contrôler un potentiel biais dans le taux de résolution de l'énigme.

De plus, les transitions entre les stades de sommeil ne sont pas aussi marquées que les recommandations internationales proposées par l'académie américaine de la médecine du sommeil. Ces recommandations définissent des critères pour attribuer à chaque période de 30 secondes d'enregistrement de polysomnographie un stade (Berry et al., 2020). Ils sont principalement utilisés en pratique clinique courante pour caractériser des troubles du sommeil. Cependant, des marqueurs électrophysiologiques de différents stades peuvent cohabiter au cours de période du sommeil, en particulier dans les périodes de transition. L'utilisation de marqueurs électrophysiologiques permet à la fois d'être plus précis sur l'implication de chaque stade du sommeil mais également de donner plus de sens à l'effet observé en rattachant un processus cognitif à un événement électrophysiologique. Ainsi les sujets ne sont plus simplement catégorisés sur la présence ou non d'un stade mais sur la quantification d'un marqueur représentatif de ce stade. Par exemple, la puissance spectrale dans la bande de fréquence delta ou sigma est un bon reflet de la quantité d'ondes lentes ou de fuseaux de sommeil (respectivement) qui sont eux-mêmes très prédominant dans le sommeil lent et associés à des mécanismes cérébraux de consolidation mnésique. L'inconvénient du sommeil paradoxal est qu'il n'existe pas de marqueurs spécifiques ou facilement accessibles associés. Le rythme thêta majoritairement présent en sommeil paradoxal est également retrouvé dans les autres stades de sommeil en plus ou moins grande quantité. Il n'existe pas d'algorithme fiable développé à ce jour permettant de quantifier les ondes en dent de scie (figures spécifiques du sommeil paradoxal). D'autres marqueurs

pourraient être discutés tels que la mesure des mouvements oculaires ou encore l'intensité du tonus musculaire.

Afin d'affiner les résultats de l'étude 3, nous prévoyons d'étudier les processus de restructuration et de résolution de problèmes par le prisme de ces marqueurs électrophysiologiques. Pour cela, nous avons réalisé une décomposition spectrale du signal EEG pendant la période d'incubation. Cela nous a permis d'obtenir la puissance spectrale moyenne au cours de l'incubation dans différentes bandes de fréquence représentatives d'événements électrophysiologiques pertinents (dans les ondes delta pour mesurer les ondes lentes, dans les ondes sigma pour mesurer les fuseaux de sommeil et dans les ondes thêta pour représenter le sommeil paradoxal). Ces analyses sont en cours et permettront de confirmer les résultats observés à l'échelle du groupe et d'apporter des informations pertinentes quant aux mécanismes cérébraux par lesquels le sommeil impacte la restructuration.

L'hypothèse alternative du N1

Le premier stade du sommeil lent (N1) présente de manière intéressante plusieurs similarités avec le sommeil paradoxal. D'abord, ils partagent des marqueurs EEG communs caractérisés par une activité cérébrale prédominante dans les rythmes thêta (Bódizs et al., 2008). De plus, ils présentent d'autres similarités capturées par les autres capteurs de la polysomnographie : une baisse du tonus musculaire (Tinguely et al., 2006) ponctuée de mouvements musculaires phasiques ou *twitches* (Nielsen, 2000) et des mouvements oculaires lents (Nielsen, 2000). Enfin, le sommeil paradoxal et le N1 sont tous deux associés à des expériences mentales riches. En particulier, le stade N1 est marqué par la présence d'hypnagogies, correspondant à des expériences perceptuelles spontanées qui surviennent lors de l'endormissement. Ces phénomènes se rapprochent des rêves associés au sommeil paradoxal (Nielsen, 2000). Ces similarités sont tellement présentes que certains auteurs considèrent le N1 comme une forme de sommeil paradoxal caché (Nielsen, 2000).

Cette phase d'endormissement a été également associée à la génération d'idées créatives comme en témoigne l'histoire de Thomas Edison et Salvador Dali. Afin de potentialiser leur découvertes ou créations artistiques, l'histoire raconte qu'ils avaient pris

l'habitude de faire des siestes à leur bureau avec un objet dans leur main. La chute de l'objet lors de l'endormissement faisait un bruit qui les réveillait : ils étaient alors en mesure d'écrire le contenu de leur pensée ou images visuelles mentales qui présentaient souvent un caractère original. Cette transition de la veille vers le sommeil (ou l'endormissement) serait un état mental propice à la créativité (Lacaux, 2021). Une étude récente a montré un effet massif du N1 dans la résolution de problèmes par découverte d'une règle cachée (Lacaux et al., 2021). Le taux de découverte de la règle était environ trois fois plus élevé lorsque les participants s'étaient endormis (avec du N1) comparativement à ceux qui restaient éveillés. Cet effet était totalement annulé lorsque le sommeil était plus profond (groupe avec N2). Dans notre étude il est à noter que le seul participant qui a trouvé l'énigme après l'incubation dans le groupe sommeil lent n'a présenté qu'une alternance de veille et somnolence ne dépassant pas le stade N1. Il semble difficile d'évaluer l'effet du N1 dans notre étude compte tenu de l'annulation de l'effet observé par Lacaux et al. lorsqu'un autre stade que le N1 était présent pendant la sieste. Un projet visant à évaluer la place du N1 dans la restructuration et la résolution de problèmes sera prochainement piloté dans l'équipe.

Partie 3

Cerveau en restructuration

Sommaire	p.
3.1 Approximer la restructuration par la CAT	330
Mécanismes impliqués dans la restructuration	
Bases neurales de la CAT	
De la CAT vers la restructuration	
3.2 Perspective dans l'étude directe des bases cérébrales de la restructuration dans la résolution de problèmes	337
Relation entre restructuration sémantique et connectivité cérébrale	
Transposer la méthode des réseaux sémantiques à la CAT	
Mesurer la restructuration dans la CAT par d'autres méthodes	

Grâce à l'étude 3, nous avons montré que la quantification des processus de restructuration par les réseaux sémantiques permettait de mettre en évidence des différences entre les individus selon une intervention centrée sur le sommeil. Mais d'autres interventions et applications pourraient être envisagées. Identifier les bases neurales de la restructuration permettrait de mieux comprendre les processus de restructuration afin de mieux cibler ces interventions ou applications. Cependant, l'étude des corrélats neuronaux de la restructuration est encore aujourd'hui un défi. Les rares études qui adressent cette question utilisent des problèmes qui supposent une restructuration, principalement du fait d'un mode de résolution avec insight. Cependant le lien entre restructuration et résolution avec insight est un sujet débattu (Becker, Wiedemann, et al., 2020; Becker et al., 2021; Cushen & Wiley, 2012), qui reste principalement théorique.

Dans cette partie, nous exposons pourquoi et comment la CAT apparait comme un matériel pertinent à utiliser pour aborder les processus cérébraux de la restructuration. Puis, nous développons des perspectives nouvelles pour étudier les bases neurales de restructuration dans la résolution de problèmes en utilisant notre méthode des réseaux sémantiques ou d'autres méthodes pour tenter de la capturer.

3.1 Approximer la restructuration par la CAT

Mécanismes impliqués dans la restructuration

La restructuration est un processus qui implique de créer ou moduler nos associations d'idées afin de générer des représentations inhabituelles, alternatives et/ou nouvelles d'un problème. Cette modulation inclut le renforcement d'associations d'idées faibles mais pertinentes pour résoudre le problème ou au contraire l'atténuation d'associations d'idées fortes mais fixantes ou trompeuses (Bowden et al., 2005). Ainsi, la restructuration est liée conceptuellement à des capacités de créativité, notamment à la capacité à associer des idées éloignées. Dans nos études 1A et 1B, la résolution des problèmes étaient corrélée à la capacité à générer des associations distantes (mesurée par la CAT) mais également à d'autres mesures de créativité (comportements créatifs écologiques et en pensée divergente). Ces corrélations suggèrent fortement que notre matériel capture une forme de créativité et qu'on se place bien dans le domaine d'une résolution de problèmes créatifs.

Alors que le lien entre restructuration et capacité à associer des idées éloignées est intuitif et supporté indirectement par nos études de corrélations, celui entre restructuration et résolution avec insight reste plus discuté. A travers les différentes théories modélisant les différentes étapes de la résolution d'un problème avec insight, la restructuration est décrite comme une étape clef (Bowden et al., 2005; Knoblich et al., 1999; MacGregor et al., 2001; Schilling, 2005). Cependant ce lien reste théorique. De plus, il est courant dans ce domaine d'étudier la restructuration en faisant l'assomption que certains problèmes sont résolus par insight. Par exemple, dans l'étude de Durso et al. (Durso et al., 1994), les auteurs annoncent décrire la restructuration d'un problème avec insight alors qu'aucun marqueur de résolution avec insight (autre que la résolution du problème lui-même) n'est utilisé. Dans l'étude 1A et 1B, nous avons recueilli pour chaque réponse le rapport subjectif de Eurêka qui constitue le marqueur de résolution de problèmes avec insight le plus utilisé dans le domaine (Laukkonen & Tangen, 2018). Nous avons montré que la résolution des énigmes était associée à une plus grande proportion de Eurêka (comparativement aux réponses incorrectes), suggérant que ces problèmes sont en majorité résolus avec insight. Cependant, le lien entre résolution avec insight et restructuration est plus difficile à établir. Dans notre étude, le faible nombre de solveurs ne nous a pas permis de tester directement ce lien. En groupant les solveurs des deux

échantillons, nous n'avons pas trouvé de différence de restructuration selon que le solveur ait rapporté un Eurêka ou non (analyses additionnelles). Ce résultat suggère que restructurer n'est pas systématiquement associé à une résolution avec insight, et inversement. Ces données sont supportées par des études récentes qui ont dissocié la restructuration de la résolution avec insight (Becker, Wiedemann, et al., 2020; Becker et al., 2021). Mais alors, que capture le rapport subjectif de Eurêka ?

Il est possible que le rapport de Eurêka ne soit pas un marqueur optimal, car sujet à la subjectivité et la variabilité inter individuelle. Des marqueurs alternatifs ont été développés comme la force de préhension mesurée par un dynamomètre (Laukkonen et al., 2021), le diamètre pupillaire (Salvi et al., 2020) ou encore l'évaluation subjective de différents critères comme l'impression de soudaineté, de changement dans la représentation du problème ou de confiance (Sandkühler & Bhattacharya, 2008). Cependant, aucune étude ne permet réellement d'étudier la spécificité/sensibilité de ses marqueurs, compte tenu de l'absence de marqueur de référence. Une autre interprétation serait que le phénomène de Eurêka reflète un certain type de restructuration. Par exemple, le Eurêka pourrait survenir lors de la création d'une nouvelle connexion entre des concepts particulièrement éloignés dans notre mémoire. Cependant, cette hypothèse ne va pas dans le sens des résultats comportementaux de l'étude 2 dans laquelle nous avons dissocié pour la première fois en utilisant la CAT l'effet de l'éloignement sémantique des mots à combiner d'une résolution avec insight. Pour certains auteurs, le phénomène de Eurêka survient lorsque l'impasse mentale est surpassée ou qu'une fixation est rompue (Ohlsson, 1984, 1992). Ainsi, une hypothèse alternative pourrait être que le phénomène de Eurêka survient lors de la rupture d'une fixation très forte ou d'une impasse mentale prolongée et coûteuse en effort cognitif. En lien avec cette hypothèse, une étude récente a proposé un modèle dans lequel le phénomène de Eurêka naitrait d'une erreur de prédiction dans la métacognition de la résolution du problème (Dubey et al., 2021). Cette métacognition nous permet de s'auto monitorer et d'inférer une valeur qui représente nos croyances sur notre capacité à résoudre le problème à un instant donné et qui s'actualise au cours du temps. Plus nous passons du temps à réfléchir à un problème (sans trouver la solution), plus notre métacognition nous indique que le temps pour le résoudre est grand. Selon leur théorie, appuyée par des modélisations comportementales associée à des données expérimentales, le Eurêka résulterait d'une erreur de prédiction positive où le temps réel de

résolution du problème est plus court que le temps inféré par nos croyances (**Figure 30**). Cette modélisation rejoint l'idée que le Eureka peut refléter une restructuration responsable d'une erreur de prédiction positive importante du fait d'une impasse mentale particulièrement importante.

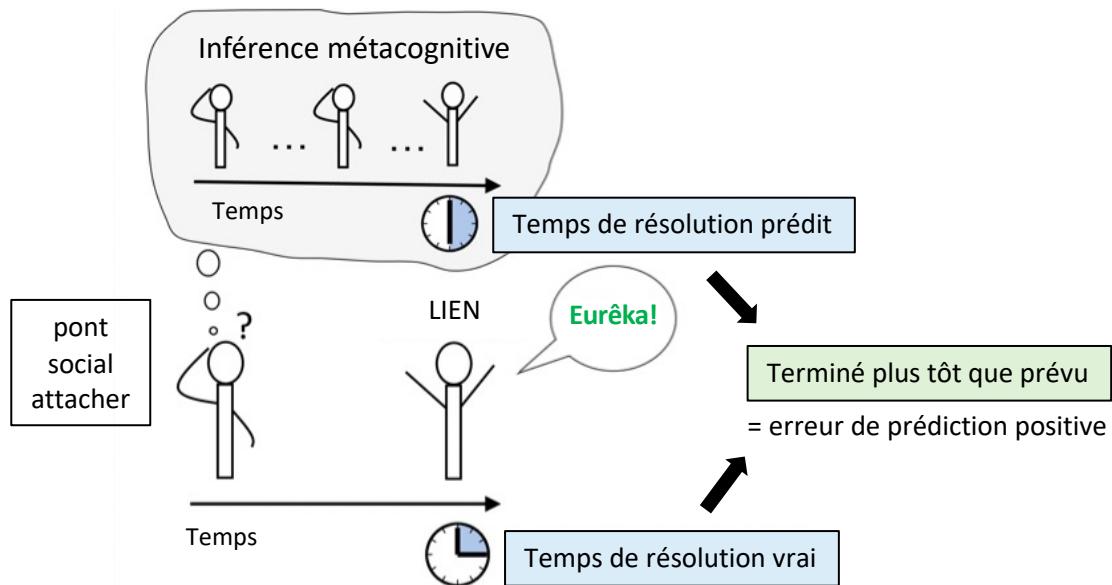


Figure 30. Le Eurêka comme une erreur de prédiction positive (Dubey et al., 2021). Le Eurêka résulte d'une différence entre le temps de résolution prédit (à partir d'inférences métacognitives sur ces capacités à résoudre le problème) et le temps de résolution vrai. Figure adaptée de Dubey et al., 2021.

L'effet de l'éloignement sémantique des idées à associer et de manière moins évidente la résolution avec insight constitueraient donc des processus indirectement en lien avec la restructuration. Étudier leurs corrélats neuronaux respectifs peut constituer des pistes pour mieux comprendre et appréhender l'étude des corrélats neuronaux associés à la restructuration. La CAT constitue une tâche d'intérêt dans cette approche puisqu'elle permet de capturer ces deux processus.

Bases neurales de la CAT

Dans l'étude 2, nous avons exploré les corrélats neuronaux associés à CAT. Cette tâche permet d'étudier l'effet de l'éloignement sémantique dans la formation d'associations d'idées et de la résolution avec insight. En utilisant un enregistrement de l'activité cérébrale par EEG, nous avons pu établir des signatures électrophysiologiques de ces deux processus. Contrairement à une grande majorité des études antérieures, nous avons adopté une approche exploratoire, c'est-à-dire sans a priori spatial (toutes les électrodes étaient incluses individuellement dans les analyses), temporel (la dimension temporelle des fenêtres d'intérêt était préservée) ou fréquentiel (où les bandes de fréquence alpha, bêta, thêta et gamma étaient explorées). De plus, cette approche était combinée à des analyses statistiques robustes comprenant une analyse statistique à deux niveaux rigoureusement corrigée pour comparaisons multiples.

Un des résultats les plus saillant est l'augmentation d'amplitude des oscillations alpha (8-12 Hz) avec à la fois l'éloignement sémantique des mots à combiner et la résolution avec insight. Ce résultat a été observé dans un groupe d'électrodes similaires (temporales gauches) mais dans des fenêtres temporelles différentes (dans la fenêtre de réflexion pour l'effet de distance sémantique et de réponse pour la résolution avec insight). En effet, l'implication des rythmes alpha est un résultat récurrent dans les quelques études ayant étudié la créativité en EEG en utilisant plusieurs tâches différentes (Fink et al., 2009; Fink & Benedek, 2014; Fink & Neubauer, 2006; Jauk et al., 2012; Jung-Beeman et al., 2004; Luft et al., 2018; Mastria et al., 2021; Mölle et al., 1996; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Shemyakina et al., 2007; Zhou et al., 2018). Les rythmes alpha ont été impliqués dans des processus d'inhibition active qui permettrait d'explorer et naviguer dans notre réseau de mémoire sémantique (Klimesch, 2012; Klimesch et al., 2007) (Figure). Plus précisément, ces processus d'inhibition permettraient de bloquer des associations proches ou évidentes permettant de faire des associations éloignées. Dans le cas d'une résolution avec insight, cette inhibition pourrait permettre de briser une impasse mentale ou une fixation forte. L'observation des régions temporales latérales antérieures et postérieures gauches dans les reconstructions de source supporte cette interprétation. Ces régions sont impliquées respectivement dans la génération d'associations sémantiques (Whitney et al., 2011) et les processus de contrôle sémantique (Noonan et al., 2013; Teige et al., 2019; Vatanserver et al., 2021).

Notre étude est la première à explorer conjointement l'effet de la distance sémantique et de la résolution avec insight dans la résolution de problèmes créatifs. Dans nos analyses comportementales, la distance sémantique des mots à combiner par rapport à la solution n'était pas significativement associée au rapport d'un Eureka, suggérant une indépendance entre ces deux processus. Les analyses EEG mettent en avant également des variations oscillatoires différentes soit sur la dimension temporelle (cluster similaire mais observé dans des fenêtres temporelles différentes) ou spatiale (cluster similaire mais observé dans des groupes d'électrodes différents). Cependant, les analyses ayant été réalisées indépendamment sur la base des données comportementales et en raison d'un manque d'essais analysables, les conclusions doivent rester précautionneuses. En particulier, l'effet sur la bande de fréquence thêta dans la période de réponse présente une fenêtre temporelle remarquablement similaire entre les deux processus. Bien que les distributions spatiales de ces deux effets à l'échelle des électrodes présentent des différences (frontales antérieures pour l'effet de distance sémantique et fronto-centrales pour la résolution avec insight), leurs reconstructions de sources soulignent la présence d'une source commune au niveau des régions operculaires frontales. Cette source est en partie composée de régions constituant le réseau de saillance (B. T. Yeo et al., 2011). Comme décrit dans l'introduction, ce réseau semble jouer un rôle d'interface entre les deux grands réseaux impliqués dans la créativité (le réseau du mode par défaut et de contrôle) (Beaty et al., 2016, 2017). Bien qu'aucune étude n'ait exploré directement le rôle de ce réseau dans la résolution de problèmes avec insight, les études IRM retrouvent souvent l'implication de régions cérébrales constituant ce réseau (régions insulaires, cortex cingulaire postérieur) (Kuang et al., 2022; W. Shen et al., 2016, 2018; Sprugnoli et al., 2017). Conceptuellement, la résolution de problèmes avec insight peut être associée à des variations attentionnelles pour attribuer plus ou moins d'attention à une représentation en cours de restructuration (Bowden et al., 2005; Salvi et al., 2015) qui sont des fonctions sous-tendues par le réseau de saillance (Eckert et al., 2009; Seeley et al., 2007). D'autres approches sont à considérer dans le futur pour préciser ces résultats et le rôle du réseau de saillance dans ces processus. En particulier, des analyses complémentaires sont en cours pour étudier l'effet de la distance sémantique et d'une résolution avec insight sur la connectivité en EEG. Dans cette approche, l'analyse de la connectivité est réalisée à l'échelle des reconstructions de sources permettant ainsi d'interpréter les résultats en termes de réseaux cérébraux intrinsèques connus. Cette approche permettra également de confirmer

l'implication du réseau de saillance dans la résolution d'une CAT et d'établir des ponts inédits entre les données de connectivité en IRM et EEG. Enfin, les reconstructions de source étant approximatives (en particulier dans notre situation où nous ne disposons pas des IRM individuelles des participants), nous avons complété cette étude par une approche par EEG intracrânien. Cette méthode sophistiquée et unique permet d'obtenir des données de haute résolution spatio-temporelle. A ce jour, j'ai collecté les données de 21 patients bénéficiant d'implantation d'électrodes intracrâniennes dans le cadre de leur prise en charge médicale et qui ont accepté de réaliser la CAT selon le même protocole que notre étude 2. Les analyses sont en cours et trop préliminaires pour pouvoir être présentées dans cette thèse.

La principale limite de l'étude 2 concerne le nombre de participants et d'essais inclus dans l'analyse. Cependant la cohérence avec des études antérieures (l'alpha dans la résolution de problèmes créatifs (Fink & Benedek, 2014), l'association alpha et gamma dans la résolution de problèmes avec insight (Jung-Beeman et al., 2004; Oh et al., 2020; Rosen & Reiner, 2016; Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Sheth et al., 2009)) est en faveur de la validité de nos résultats. Le calcul d'une puissance (a priori ou a posteriori) est rendu difficile considérant nos approches statistiques et leur correction pour comparaisons multiples. De plus, une étude récente a montré qu'aucune recommandation univoque ne pouvait être établie concernant le nombre de sujets ou d'essais à inclure dans les études d'EEG ou MEG, parce que la détection d'un effet (et donc la puissance statistique) varie à travers le cerveau (Chaumon et al., 2021).

De la CAT vers la restructuration

L'étude 2 a permis d'extraire des corrélats EEG en rapport avec deux processus en lien avec la résolution d'un problème créatif (l'effet de l'éloignement sémantique dans la combinaison d'idées et la résolution du problème avec insight). Ces deux processus peuvent être conceptuellement rapprochés de certaines opérations mentales qui sous-tendent les phénomènes de restructuration dans la résolution de problèmes créatifs. Ainsi, les bases neurales de la CAT permettraient d'établir des hypothèses sur les mécanismes cérébraux impliqués dans les processus de restructuration. En intervenant sur des régions d'intérêt, nous

pourrions explorer l'impact sur les processus de restructuration quantifiés par notre méthode des réseaux sémantiques.

Une première approche pourrait se baser sur des a priori anatomiques correspondant aux régions cérébrales identifiées dans l'étude 2 (principalement les régions temporales antérieures et postérieures gauches ou operculaires frontales droites) ou d'autres études (cortex préfrontal rostro-latéral gauche) (Bendetowicz et al., 2018). Ces régions cérébrales pourraient devenir des cibles d'intérêt pour des études de stimulations transcrâniennes. Un schéma expérimental similaire à celui de notre étude 3 pourrait être construit en remplaçant la sieste par une session de stimulation. Ainsi, par inhibition ou excitation des régions d'intérêt, on pourrait observer une modulation de la restructuration (et plus ou moins de la résolution de problèmes). Une alternative serait d'étudier les patients cérébrolésés pour évaluer l'impact d'une lésion cérébrale sur la restructuration. Cette approche pose le problème de savoir quand évaluer le réseau basal. L'étude des patients souffrant d'une lésion tumorale à croissance lente (gliome de bas grade) pourrait dans ce cas précis être pertinent pour plusieurs raisons. D'abord, parce que l'intervention chirurgicale est programmée facilitant la planification des moments où les réseaux sémantiques peuvent être construits. Ce point est crucial afin d'harmoniser les patients et les contrôles. Ensuite, parce que les localisations préférentielles de ces tumeurs correspondent souvent à des régions recrutées dans les tâches de créativité (Bieth et al., 2021). En parallèle de cette thèse, je conduis un travail visant à évaluer l'impact post opératoire d'une exérèse d'une lésion tumorale sur les capacités créatives. Les résultats préliminaires montrent que ces patients présentent une altération dans plusieurs tâches de créativité. En plus d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux impliqués dans la créativité, la restructuration et la résolution de problèmes, ces approches pourraient permettre également de souligner l'importance d'une évaluation cognitive plus fine chez ces patients afin de rendre compte de difficultés dans leur quotidien, d'apprécier le retentissement sur leur qualité de vie et d'orienter une rééducation cognitive.

Une deuxième approche pourrait cette fois-ci se baser sur des a priori fréquentiels correspondant aux fréquences dans lesquelles nous avons observé nos résultats dans l'étude 2. Des techniques de stimulations transcrâniennes permettent de stimuler des régions

cérébrales selon un rythme précis pouvant ainsi entraîner l'activité cérébrale dans un certain rythme d'oscillation pendant une période (Helfrich et al., 2014). Luft et al. (Luft et al., 2018) ont montré, en utilisant la *Remote Associates Task*, qu'une induction de rythme alpha dans les régions temporales droites était associée à une augmentation de résolution des essais. Par adaptation du matériel, les auteurs ont pu avancer que cet effet semblait en lien avec une meilleure capacité à inhiber les associations d'idées évidentes. Ce travail pourrait être appliqué à une exploration plus directe sur l'organisation des réseaux sémantiques au cours de la restructuration. Enfin, des techniques de neurofeedback pourraient également être appliquées. Une étude a montré que s'entraîner à atteindre un état mental associé à des oscillations alpha (en étant guidé par une interface machine) permettait de résoudre plus rapidement des *Remote Associates Task* (Haarmann et al., 2012).

3.2 Perspective dans l'étude directe des bases cérébrales de la restructuration dans la résolution de problème

Relation entre restructuration sémantique et connectivité cérébrale

Une avancée majeure serait d'identifier comment la connectivité cérébrale permet de prédire la restructuration d'un réseau sémantique relatif à un problème ou sa résolution. Le *connectome predictive modeling* (CPM) est une méthode originale qui permet d'identifier des patterns de connectivité fonctionnelle cérébrale pouvant prédire des fonctions cognitives complexes. Cette méthode a été appliquée dans le domaine de la créativité (Beaty, Kenett, et al., 2018; Frith et al., 2021; X. Shen et al., 2017) et en particulier par notre équipe de recherche (M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022; M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022). Plus précisément, Ovando-tellez et al. (M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022) ont montré que la connectivité fonctionnelle cérébrale permettait de prédire l'organisation des réseaux sémantiques des individus déterminée par la valeur de métrique préalablement mise en relation avec une mesure de créativité écologique (questionnaire ICAA). Cette méthode pourrait être appliquée à la question de la restructuration. Dans notre situation, les variables à prédire par le CPM à partir de pattern de connectivité fonctionnelle cérébrale seraient la résolution du problème ou la restructuration locale (qui a été associée à la résolution du problème) (**Figure 31**).

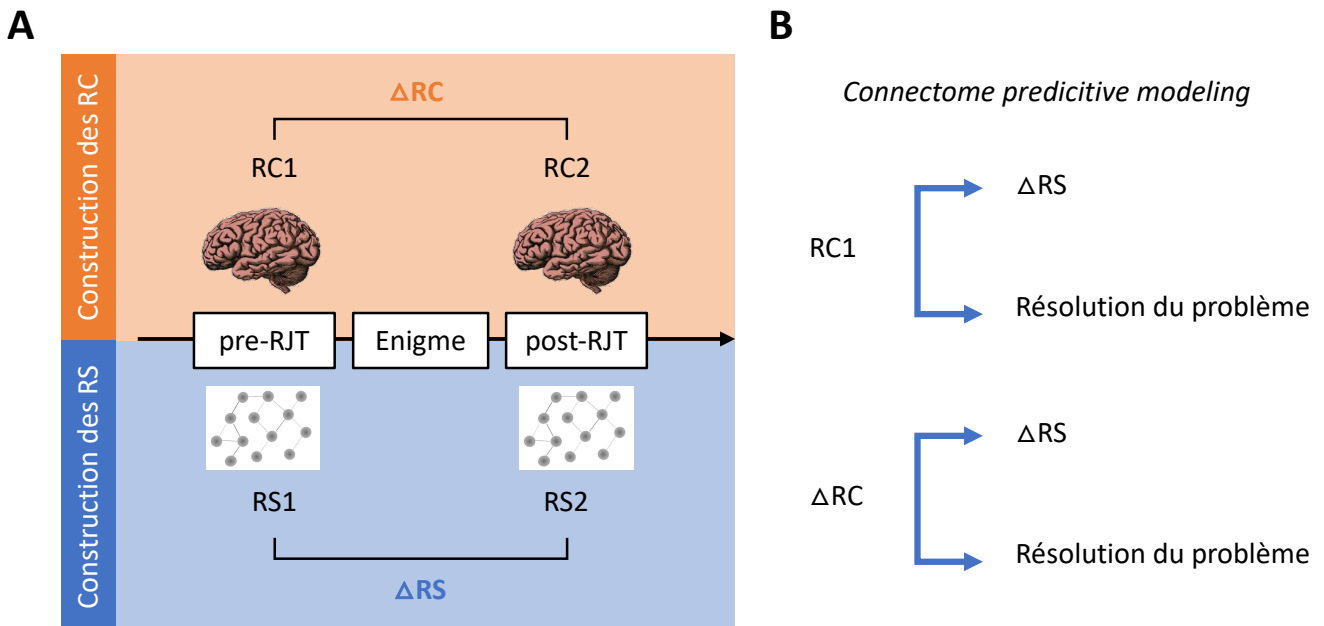


Figure 31. Application du CPM à la restructuration et la résolution de problèmes. Schéma expérimental (A) dans lequel le RC1 ou le ΔRC peuvent être utilisés pour prédire le ΔRS et la résolution de problèmes (B). RS – réseau sémantique, RC – réseau cérébral

Un point intéressant est de déterminer avec quelles données de connectivité fonctionnelle le CPM peut prédire la résolution de problèmes et la restructuration. Une approche directe serait d'utiliser la méthode de Ovando-Tellez et al. (M. Ovando-Tellez, Kenett, et al., 2022). Dans cette approche, les auteurs ont utilisé les données d'IRM fonctionnelle pendant la réalisation de la RJT pour extraire les données de connectivité fonctionnelle cérébrale. Dans notre étude, cela correspondrait à utiliser la première RJT (avant la présentation du problème) et cela permettrait d'émettre des hypothèses à l'échelle des traits individuels. Une conclusion pourrait par exemple être que plus un individu présente une connectivité importante dans le réseau de contrôle, plus il aura une plus grande restructuration de ces réseaux sémantiques ou une plus grande probabilité de résoudre le problème. L'alternative serait d'utiliser une acquisition de données IRM pendant les deux RJT afin de créer un changement de connectivité cérébrale entre la première RJT (avant la présentation du problème) et la deuxième RJT (après la tentative de résolution). Prédire une restructuration des réseaux sémantiques et/ou la résolution du problème à partir d'une

restructuration de la connectivité fonctionnelle cérébrale permettrait d'émettre des conclusions à l'échelle des mécanismes cérébraux sans précédents.

Transposer la méthode des réseaux sémantiques à la CAT

Une alternative serait d'adapter notre méthode de construction de réseaux sémantiques à d'autres matériels de résolution de problèmes supposant une restructuration. Prenons l'exemple de la CAT dans laquelle il est nécessaire de combiner des éléments sans lien évident entre eux, suggérant de modifier sa représentation des mots afin de les associer. Cette tâche a été utilisée dans plusieurs modalités de neuroimagerie et est souvent utilisée pour étudier la restructuration du fait de sa résolution fréquente avec un Eurêka (C.-L. Wu et al., 2020).

L'application de notre méthode des réseaux sémantiques appliquées à la CAT semble difficile. La principale limitation concerne la spécificité du réseau au problème posé. Dans nos études reliant la restructuration à la résolution de problèmes, les réseaux sémantiques étaient spécifiques d'un problème (celui à résoudre ou le problème analogue de celui à résoudre). Ici, la CAT se présente comme une tâche composée d'une multitude d'essais (jusqu'à 100 ou plus selon les différentes versions développée) dont la durée maximale de résolution est 30s (mais dans notre expérience rarement plus de 10s en moyenne). Il n'est donc pas possible de réaliser un réseau sémantique spécifiques avant et après chaque essai, en particulier en raison de la faisabilité pratique (l'expérience serait trop longue).

Pour dépasser cette limite, une possibilité serait de construire des réseaux à l'échelle de la tâche et non des essais uniques. Par exemple, un réseau de grande envergure pourrait être construit avant le premier essai de la tâche et après le dernier essai de la tâche. Ces réseaux sémantiques seraient composés de mots en rapport avec les mots indices et solutions de la CAT et des mots neutres. L'objectif serait d'évaluer si le nombre de CAT résolues est corrélé à un changement d'organisation des réseaux sémantiques. Les résultats attendus concerneraient des changements à l'échelle globale des réseaux puisqu'il paraît difficile de capturer des changements spécifiques aux essais compte tenu de leur nombre.

Mesurer la restructuration dans la CAT par d'autres méthodes

Une dernière alternative serait de mesurer la restructuration par une autre méthode que les réseaux sémantiques. Becker et al. (Becker, Wiedemann, et al., 2020) ont proposé une adaptation de la *Remote Associates Task* pour capturer l'effet de restructuration en utilisant des mots polysémiques (i.e., à multiples sens ou usages sémantiques). Leur adaptation consiste à utiliser comme premier mot d'un triplet un mot polysémique présentant plusieurs sens (e.g., crème – chaud – rayon où crème présente plusieurs usages sémantiques). En ajoutant un indice présenté avant et pendant la résolution d'un essai, les auteurs avancent pouvoir manipuler quel sens ou espace sémantique l'individu va attribuer au premier mot polysémique. Ces indices peuvent correspondre à un mot à l'origine d'une représentation du mot ambigu proche de la solution (indice proche, e.g., plage), ou au contraire d'une représentation éloignée de la solution (indice éloigné, e.g., maquillage). Dans le cas d'un indice éloigné, les auteurs avancent qu'une restructuration est nécessaire pour modifier l'espace sémantique initial vers une représentation pertinente pour trouver la solution (i.e., soleil). Cette tâche a présenté des résultats concordant avec cette hypothèse en montrant notamment que les essais à indice éloigné (comparativement à ceux à indice proche) présentaient un temps de réponse plus long, des efforts de recherche plus intenses, une diminution du nombre de réponses correctes et un recrutement de régions impliquées dans le contrôle cognitif (gyrus frontal inférieur et le cortex cingulaire antérieur) (Becker et al., 2021; Becker, Sommer, et al., 2020; Becker, Wiedemann, et al., 2020). Cette adaptation met en avant l'utilisation prometteuse de mots polysémiques dans la compréhension de l'organisation, l'exploration et les changements dans l'organisation de notre mémoire sémantique, à l'image des travaux dans notre équipe de recherche (M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022). Bien que cette adaptation soit totalement pertinente et ingénieuse, la mesure de restructuration reste indirecte (pas de mesure qu'il s'opère une restructuration) et focalisée à un mot indice de la tâche. De plus, on ne sait pas ce que donne un indice éloigné pour un mot polysémique qui aurait un sens dominant très fort par rapport aux autres.

Une adaptation pertinente serait de développer des CAT ambiguës (ambiCAT). Ces ambiCAT seraient constituées de trois mots indices éloignés correspondant à trois sens différents d'un mot polysémique qui serait la solution (e.g., radioactivité – vélo – diamètre où la solution attendue serait rayon). La construction de ce matériel serait facilitée par

l'acquisition antérieure (M. Ovando-Tellez, Benedek, et al., 2022) et pendant cette thèse de performances de 75 participants réalisant des fluences associatives sur différents mots polysémiques. Selon la théorie de Schilling, une forme de restructuration associée à l'insight serait la création d'un raccourci entre des sous communautés dans un réseau sémantique à l'origine d'une cascade de nouvelles associations d'idées (Schilling, 2005). Dans le cas d'une ambiTAC, les trois mots appartiendraient à trois communautés différentes. La solution correspondrait à un pont entre ces communautés à l'origine d'une restructuration. Ainsi, de nouvelles associations d'idées pourraient être plus fortes en lien avec le fait de trouver la solution (e.g., roue – périmètre faisant partie respectivement de la communauté vélo et diamètre). A l'échelle des réseaux sémantiques, on pourrait observer des changements vers un réseau moins modulaire (moins sous partitionné), plus compact, plus efficient et plus interconnecté. Cette restructuration pourrait alors être capturée et mesurée.

Partie 4

Une vision intégrative de la restructuration pour des applications pratiques

Sommaire	p.
4.1 La restructuration comme potentiel outil pédagogique	343
Comprendre et interpréter un problème	
Le transfert dans la résolution de problèmes	
La consolidation à travers le sommeil	
4.2 La restructuration comme mesure d'un état mental	347

Nous avons vu à travers les différentes parties de cette discussion que la restructuration était liée à la résolution de problèmes (créatifs et analogues), que le sommeil paradoxal était un facteur permettant de moduler la restructuration, et que des hypothèses pouvaient être évoquées à travers l'étude d'autres tâches concernant les bases neurales associées à la restructuration et la résolution de problèmes. Nous proposons dans cette dernière partie de développer des perspectives d'applications concrètes permettant d'élargir nos résultats à d'autres domaines. En particulier, nous proposons sur la base de nos résultats des clefs théoriques dans le domaine de l'éducation et des apprentissages scolaires pour répondre aux difficultés des élèves dans le domaine de la résolution de problèmes. Enfin, nous exposons comment la restructuration peut être appliquée à d'autre domaine que la résolution de problèmes, notamment dans celui médical en accédant à une mesure d'un changement d'état mental.

4.1 La restructuration comme potentiel outil pédagogique

Un rapport récent a été communiqué par le ministre de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports pour alerter sur les difficultés des élèves à résoudre des problèmes (<https://eduscol.education.fr/document/13132/download>). Dans ce rapport, qui s'adresse principalement aux enseignants de tous niveaux scolaires, plusieurs points sont abordés faisant écho à notre questions scientifiques sur le rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes. Ces points font référence à la représentation initiale du problème, le transfert par analogie et l'importance de la consolidation dans le domaine de la résolution de problèmes.

Dans cette partie, nous reprenons ces points d'intérêt en résumant la problématique exposée dans le rapport puis en proposant des pistes de réponses sur la base de notre travail. Bien conscient que cette problématique est complexe, implique de multiples domaines en dehors des neurosciences et nécessite une expertise plus large que celle apportée par ce travail, je n'avance pas avoir les solutions mais essaye d'apporter un point de vue constructif principalement théorique qui pourrait servir dans le futur.

Comprendre et interpréter un problème

Le premier point abordé par le rapport concerne la façon dont les élèves comprennent, interprètent et se représentent le problème. Cette étape est primordiale dans la résolution de problèmes puisqu'elle permet de mettre en place une réflexion, un raisonnement et des stratégies pour trouver la solution au problème. Chaque enfant doit mobiliser des concepts pour produire une représentation initiale du problème, qui peut être limitée par le manque de connaissance ou influencée par des idées intuitives. Ainsi, la représentation initiale du problème peut être une véritable limite pour l'enfant si elle ne correspond pas à une représentation associée à la solution, en particulier si l'enfant n'arrive pas à la modifier. Cette idée renvoie directement au rôle de la restructuration dans la résolution de problèmes, i.e., le changement de la représentation initiale du problème vers une représentation permettant de trouver sa solution. Comment aider les élèves à penser autrement, à changer leur représentation d'un problème ?

Une solution serait de passer plus de temps à l'apprentissage pour analyser l'énoncé du problème. A partir des éléments du problème, on peut s'entraîner à générer des représentations alternatives permettant de définir autrement le problème. Un travail en groupe pourrait par exemple permettre d'intégrer les représentations des différents élèves d'une classe, percevant ainsi des représentations différentes pour enrichir les siennes. Cette idée rejoint celle du « recodage sémantique » qui correspond à une démarche d'apprentissage dans laquelle les élève sont aidés à surpasser la structure induite par le contenu sémantique de l'énoncé (Gamo et al., 2010, 2014b). Cette approche a montré son efficacité chez des élèves dans un parcours scolaire classique (Gamo et al., 2010) et spécialisé (Gamo et al., 2014a). Elle a fait l'objet d'un axe principal d'un dispositif d'enseignement mathématiques (ACE) qui a confirmé ces résultats sur une approche nationale (Vilette et al., 2017). Cette approche fait écho à l'idée de restructuration dans la résolution de problème. Nos résultats supportent donc cette méthode de recodage sémantique qui semblent être prometteuse, en particulier pour les enfants défavorisés, et propose un outil permettant d'aider ou mesurer cette intervention pédagogique.

Une alternative est d'agir sur les connaissances naïves (Sander, 2017). Elles correspondent à des éléments d'apprentissages scolaires interprétés par le prisme d'expériences ou de connaissances issues de la vie quotidienne, de l'environnement, mais également des autres domaines d'apprentissage. Elles peuvent être à l'origine d'une représentation biaisée du problème bloquant toute possibilité de résolution. Ces connaissances naïves ne doivent pas être ignorées mais au contraire être anticipées afin de les contrer. Des interventions pourraient être utilisées afin d'ouvrir le champ des possibilités représentationnelles d'un problème. Une manière serait de travailler sur les associations d'idées avant la présentation d'un problème. Prenons un exemple concret : la soustraction est habituellement associée à l'idée de perdre quelque chose (e.g., « *Oscar achète trois pêches au marché. Il en donne une à Jasmine. Combien de pêches a-t-il donné ?* »). Cependant, certains problèmes peuvent utiliser la stratégie de la soustraction dans l'idée de gagner quelque chose (« Pour aller rendre visite à Oscar, Jasmine prend le train qui arrive à 12h. Elle arrive finalement à 11h30. Combien de temps Jasmine a-t-elle gagné pendant son voyage ? »). Travailler sur la perception d'une association d'idées inhabituelle (e.g., soustraction – gagner) pourrait permettre de préparer l'esprit à des alternatives de représentation du problème et

limiter le biais cognitif en rapport avec ces intuitions qui ne sont pas toujours vérifiées en pratique.

Préparer les enfants à avoir des représentations différentes d'un problème et à changer les représentations initiales d'un problème (i.e., restructurer) pourraient aider à mieux appréhender sa résolution. De plus, entraîner son esprit à penser autrement et à générer des idées alternatives est une capacité importante pour le développement d'un esprit critique, créatif et ouvert. Dans ces approches, le rôle de l'enseignant est primordial dans la compréhension et représentation du problème. Il permet d'aider à combler le manque de connaissances (pouvant limiter la compréhension du problème), à mobiliser les concepts pour faire générer des représentations différentes et à anticiper les connaissances naïves à l'origine de représentations erronées du problème. Cet exercice de restructuration pourrait également être bénéfique pour les capacités de transfert par analogie du fait du lien mécanistique observé dans nos études. Le transfert par analogie fait l'objet du deuxième point du rapport de l'éducation nationale que nous discutons ici.

Le transfert dans la résolution de problèmes

Le transfert par analogie constitue un aspect important dans l'éducation cependant le rapport mentionne de réelles difficultés pour les enfants à mettre en place ce type de raisonnement qui sont souvent confrontés à des échecs. Le transfert par analogie permet la résolution de nouveaux problèmes ayant des structures similaires mais avec des présentations différentes. Il permet également d'étendre les problèmes théoriques rencontrés à l'école vers une application plus écologique dans les problèmes de la vie quotidienne. L'étape importante pour appliquer un transfert analogique efficace est de rappeler une situation source (i.e., problème déjà rencontré et connu) qui apparaît pertinent pour résoudre le problème cible (i.e., le problème à résoudre). Le rappel du problème source dépend des informations qui ont été encodées et intégrées en mémoire lors de sa résolution. Ainsi, ce rappel peut être influencé par l'encodage de similarités superficielles qui peuvent biaiser l'évocation analogique par le rappel d'un problème source où le transfert par analogie ne peut pas être efficient (Bassok & Olseth, 1995; Novick, 1988; Sander & Richard, 2005). Supportant cette idée, une étude a étudié comment des élèves de collège pouvaient regrouper ensemble

différents problèmes mathématiques. Les élèves qui avaient tendance à regrouper les problèmes sur des critères structurels (e.g., tous les problèmes nécessitant le calcul d'une moyenne) présentaient plus de facilités scolaires que ceux qui utilisaient des critères superficiels (e.g., tous les problèmes faisant référence à un achat) (Silver, 1981). En contrepartie, l'absence de similarités superficielles entre deux problèmes peut être un facteur limitant le transfert par analogie de manière spontanée (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Reed et al., 1974). Comment aider les enfants à construire un raisonnement efficient, notamment par l'utilisation d'un transfert par analogie efficace ?

Le point essentiel ici réside dans le contrôle des informations encodées par les élèves lors de l'encodage du problème source. Une manière serait d'insister sur les propriétés structurelles du problème initial ou d'en donner de nombreux exemples (Gentner & Colhoun, 2010). Une autre manière serait de familiariser le transfert par l'utilisation de problèmes cibles dont le domaine (ou similarité superficielles) seraient de plus en plus éloignés ou de demander aux élèves de produire des problèmes analogues sur la base du problème source et du schéma d'analogie. Enfin, le matériel de la SATT pourrait également être une manière d'entraîner les enfants à détecter les différents degrés de similarité entre des éléments. Le but pourrait être de regrouper des stimuli selon les différents schémas d'analogie utilisés pour mettre en avant la détection de similarités structurelles et de travailler leur capacité d'abstraction.

La consolidation à travers le sommeil

La consolidation mnésique dans la résolution de problèmes est un point également évoqué dans le rapport car ce processus fait partie des piliers des fondements cognitifs appliqués aux apprentissages scolaires développés par Dehaene et al. (Dehaene, 2016). La consolidation mnésique permet la formation et l'extraction de schémas généraux de connaissances facilitant ensuite leur intégration, leur acquisition et leur application à d'autres domaines. Comme largement développé dans ce travail, le sommeil est un acteur qui faciliterait la consolidation. Nous avons montré que le sommeil (en particulier le sommeil paradoxal) facilitait la réorganisation de nos associations d'idées notamment en renforçant ou générant des associations d'idées inhabituelles. En revanche, l'effet du sommeil sur la résolution du problème reste plus incertain et probablement plus complexe à étudier.

Cependant, chez l'enfant, le sommeil a été associé à l'acquisition et l'apprentissage de nouveaux concepts (Kurdziel et al., 2013) et des apprentissages scolaires (Wilhelm et al., 2013). Il est donc légitime de considérer le sommeil comme un facteur d'intérêt dans l'apprentissage scolaire, notamment appliqué à la résolution de problèmes. Dans notre travail, des analyses sont en cours pour étudier le rôle du sommeil dans le transfert par analogie (appliqué aux énigmes et à la SATT) mais également médié par son effet sur la restructuration. Ces analyses pourraient avoir de réelles implications futures sur la manière de penser l'aménagement du temps scolaire.

4.2 La restructuration comme mesure d'un état mental

Un apport majeur de ce travail de thèse réside dans le développement d'une méthode capturant et quantifiant les processus de restructuration permettant de les mettre en lien avec la résolution de problèmes. Marqueur ou mécanisme de résolution de problèmes, quelle que soit la réponse à cette question, la mesure de restructuration et son lien avec la résolution de problèmes restent pertinents. Nos résultats montrent que la restructuration capture un changement mental associé à la résolution de problèmes. Ainsi la mesure de restructuration pourrait être une cible de choix pour des interventions visant à améliorer les performances de résolution de problèmes ou une manière de monitorer un changement d'état mental.

A l'image de l'étude du sommeil, la mesure de restructuration par les réseaux sémantiques offre de nouvelles perspectives dans l'étude des facteurs pouvant moduler nos associations d'idées. En plus de contribuer à la compréhension des bases neurales de la restructuration, les techniques de stimulation magnétique transcrâniennes ou de neurofeedback présentées dans la partie précédente pourraient permettre d'aider à modifier l'organisation de nos réseaux sémantiques. Cette restructuration permettrait de générer des représentations alternatives du problèmes et possiblement de le résoudre.

L'application de la restructuration pourrait s'étendre à d'autres domaines que celui de la résolution de problèmes, notamment dans le domaine médical. En effet, l'outil de mesure de la restructuration pourrait être utilisé pour quantifier l'évaluation d'une intervention thérapeutique dans certaines pathologies. Prenons l'exemple concret de l'insomnie. La prise

en charge de ce trouble du sommeil repose principalement sur la mise en place d'une thérapie cognitivo-comportementale dont le but est de modifier le comportement du patient par des interventions cognitives. Ainsi, les objectifs des séances pour réduire l'insomnie sont par exemple de limiter les ruminations anxieuses et croyances irrationnelles relatives au sommeil (« je dois absolument rester au lit », « je dois rester longtemps au lit pour que le sommeil arrive », « tout le monde arrive à dormir sauf moi », ...) et obtenir du patient des attentes réalistes. Quantifier si ces représentations mentales sont toujours dominantes dans l'esprit d'un individu (à partir des réseaux sémantiques) pourrait permettre de monitorer les progrès du patient dans le cadre d'un programme de thérapie cognitivo-comportementale et possiblement indiquer au thérapeute les points primordiaux sur lesquels le patient doit travailler. Cet exemple peut s'étendre à d'autres contextes pathologiques qui se construisent sur des associations d'idées fortes voire envahissantes comme par exemple les troubles obsessionnels compulsifs (e.g., l'obsession de propreté est-elle centrale dans l'organisation du réseau sémantique ?), ou encore l'addiction (l'envie de fumer est-elle centrale dans l'organisation de mon réseau sémantique ?). Par exemple, une dépendance à la cigarette pourrait se traduire par une association dominante entre fumée et tabac comparativement à l'association fumée et incendie. Cette dominance pourrait s'inverser en cas de libération de la dépendance psychique.

Une autre application originale serait l'utilisation des réseaux sémantiques pour monitorer une maladie chronique. Prenons l'exemple de la dépression. Lorsque le patient est stabilisé, un réseau sémantique de référence peut être construit. Dans le suivi médical, d'autres réseaux pourraient être réalisés dont l'objectif serait de capturer des changements annonciateurs d'une fragilité thymique pouvant alerter sur l'éventualité d'une rechute. Lors d'une rechute thymique, des associations d'idées pourraient être modifiées selon un gradient capturant des valences émotionnelles négatives ou pessimistes. Cette approche permettrait de détecter plus précocement une rechute afin d'intervenir plus rapidement.

La principale difficulté de cette approche est probablement liée à la construction de la liste de mots à utiliser dans la RJT. Cette liste de mots doit être adaptée au contexte étudié voire même du patient, pour pouvoir capturer des états mentaux représentatifs du contexte pathologique étudié. Cette approche présente cependant l'avantage d'utiliser une mesure

indirecte et spontanée du trouble. En effet, son évaluation n'est pas réalisée frontalement mais de manière contournée limitant ainsi les biais individuels dans l'estimation de ses troubles, souvent évalués par des questionnaires ou des entretiens qui se basent sur le discours du patient.

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes confrontés à une question primordiale mais complexe : comment résout-on des problèmes ? En particulier, nous nous sommes intéressés aux phénomènes de restructuration supposés permettre la résolution de problèmes par la modification de la représentation initiale du problème. Paradoxalement à l'acceptation générale de cette théorie, les preuves empiriques permettant de la confirmer sont manquantes, en particulier du fait de la difficulté à prétendre quantifier ce phénomène.

Pour répondre à cette limite, nous avons développé un nouvel outil qui vise à quantifier ces phénomènes de restructuration en combinant les neurosciences de la créativité et du raisonnement par analogie avec celles des réseaux. Les réseaux sémantiques construits à partir de mots relatifs à un problème permettent d'approximer la manière dont un individu se représente ce problème. La mesure des changements qui s'opèrent dans l'organisation des réseaux sémantiques au cours de la résolution de problèmes permet de capturer les changements représentationnels du problème (i.e., la restructuration).

L'utilisation de cette méthode nous a permis de concrétiser trois avancées majeures dans le domaine de la résolution de problèmes. D'abord, de confirmer le lien supposé entre la restructuration et la résolution de problèmes créatifs. Ensuite, d'établir un lien nouveau entre la restructuration d'un problème initial et la résolution d'un problème analogue, permettant d'avancer de manière plus générale le rôle mécanistique de la restructuration dans la résolution de problèmes. Enfin, d'établir le rôle facilitateur du sommeil paradoxal dans la génération d'associations d'idées, établissant directement son lien avec un état mental d'hyper-associativité, suggéré par plusieurs modèles théoriques.

Mieux comprendre les bases neurales de la restructuration permettrait de mieux cibler les interventions ou applications possibles pour moduler nos capacités à résoudre des problèmes. Cependant, l'étude des corrélats neuronaux de la restructuration est encore aujourd'hui un défi. Notre travail a contribué à apporter de nouvelle connaissance dans les bases neurales de la résolution de problèmes créatifs à travers l'étude de deux mécanismes supposés impliqués dans la restructuration. La description de leur expression

électrophysiologique permet d'établir de nouvelles des hypothèses pour l'exploration future de cette questions non résolue.

Comprendre comment on résout des problèmes et les facteurs qui peuvent les moduler ne sont pas des questions anodines. La résolution de problèmes est une fonction clef dans notre vie quotidienne et présentent des enjeux majeurs pour nos capacités de raisonnement critiques, de pensées créatives et d'adaptation à des changements rapides, brutaux, parfois menaçants. Nos résultats apportent de nouvelles connaissances permettant d'entrevoir des applications futures dans le domaine de la résolution de problèmes. Mais la restructuration ne s'arrête pas à la résolution de problème et d'autres applications pourraient se construire autour de cette évaluation qualitative et quantitative du contenu de la pensée.

Références

- Abraham, A., Beudt, S., Ott, D. V. M., & Yves von Cramon, D. (2012). Creative cognition and the brain : Dissociations between frontal, parietal–temporal and basal ganglia groups. *Brain Research, 1482*, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.09.007>
- Agogué, M., Kazakçı, A., Weil, B., & Cassotti, M. (2011). *The impact of examples on creative design : Explaining fixation and stimulation effects*. DS 68-2: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 2: Design Theory and Research Methodology, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08. 2011.
- Aichelburg, C., Urbanski, M., Thiebaut de Schotten, M., Humbert, F., Levy, R., & Volle, E. (2016). Morphometry of Left Frontal and Temporal Poles Predicts Analogical Reasoning Abilities. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 26(3), 915-932. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu254>
- Amabile, T. M. (1983). The social psychology of creativity : A componential conceptualization. *Journal of personality and social psychology, 45*(2), 357.
- Amabile, T. M., Collins, M. A., Conti, R., Phillips, E., Picariello, M., Ruscio, J., & Whitney, D. (2018). *Creativity in context : Update to the social psychology of creativity*. Routledge.
- Amabile, T. M., & Pillemer, J. (2012). Perspectives on the social psychology of creativity. *The Journal of Creative Behavior, 46*(1), 3-15.
- Andrews-Hanna, J. R., Reidler, J. S., Huang, C., & Buckner, R. L. (2010). Evidence for the Default Network's Role in Spontaneous Cognition. *Journal of Neurophysiology, 104*(1), 322-335. <https://doi.org/10.1152/jn.00830.2009>
- 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. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1316*(1), 29-52. <https://doi.org/10.1111/nyas.12360>
- Antonietti, A., & Balconi, M. (2010). *Analogical reasoning : An incremental or insightful process ? What cognitive and cortical evidence suggests*.
- Antrobus, J. (1983). REM and NREM sleep reports : Comparison of word frequencies by cognitive classes. *Psychophysiology, 20*(5), 562-568.

- Arden, R., Chavez, R. S., Grazioplene, R., & Jung, R. E. (2010). Neuroimaging creativity : A psychometric view. *Behavioural Brain Research*, 214(2), 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.05.015>
- Ash, I. K., Cushen, P. J., & Wiley, J. (2009). Obstacles in investigating the role of restructuring in insightful problem solving. *The Journal of Problem Solving*, 2(2).
- Baird, B., Mota-Rolim, S. A., & Dresler, M. (2019). The cognitive neuroscience of lucid dreaming. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 100, 305-323. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.03.008>
- Barbot, B. (2018). The Dynamics of Creative Ideation : Introducing a New Assessment Paradigm. *Frontiers in Psychology*, 9, 2529. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02529>
- Barnett, S. M., & Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? : A taxonomy for far transfer. *Psychological Bulletin*, 128(4), 612-637. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.128.4.612>
- Baronchelli, A., Ferrer-i-Cancho, R., Pastor-Satorras, R., Chater, N., & Christiansen, M. H. (2013). Networks in Cognitive Science. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(7), 348-360. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.04.010>
- Bassett, D. S., & Sporns, O. (2017). Network neuroscience. *Nature Neuroscience*, 20(3), 353-364. <https://doi.org/10.1038/nn.4502>
- Bassok, M., & Olseth, K. L. (1995). Object-based representations : Transfer between cases of continuous and discrete models of change. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(6), 1522.
- Battaglia, F. P., Sutherland, G. R., & McNaughton, B. L. (2004). Hippocampal sharp wave bursts coincide with neocortical "up-state" transitions. *Learning & memory*, 11(6), 697-704.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Barry Kaufman, S., & Silvia, P. J. (2015). Default and executive network coupling supports creative idea production. *Scientific reports*, 5(1), 1-14.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Silvia, P. J., & Schacter, D. L. (2016). Creative Cognition and Brain Network Dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(2), 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.10.004>
- 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. *Human brain mapping*, 39(2), 811-821.

- 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., Johnson, D. R., Zeitlen, D. C., & Forthmann, B. (2022). Semantic Distance And the Alternate Uses Task : Recommendations for Reliable Automated Assessment of Originality. *Creativity Research Journal*, 1-16.
- Beaty, R. E., Kenett, Y. N., Christensen, A. P., Rosenberg, M. D., Benedek, M., Chen, Q., Fink, A., Qiu, J., Kwapil, T. R., Kane, M. J., & Silvia, P. J. (2018). Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(5), 1087-1092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713532115>
- Beckage, N. M., & Colunga, E. (2016). Language networks as models of cognition : Understanding cognition through language. *Towards a theoretical framework for analyzing complex linguistic networks*, 3-28.
- Becker, M., & Cabeza, R. (2022). Assessing creativity independently of language : A language-independent remote associate task (LI-RAT). *Behavior Research Methods*, 1-18.
- Becker, M., Kühn, S., & Sommer, T. (2021). Verbal insight revisited—Dissociable neurocognitive processes underlying solutions accompanied by an AHA! experience with and without prior restructuring. *Journal of Cognitive Psychology*, *33*(6-7), 659-684. <https://doi.org/10.1080/20445911.2020.1819297>
- Becker, M., Sommer, T., & Kühn, S. (2020). Verbal insight revisited : fMRI evidence for early processing in bilateral insulae for solutions with AHA! experience shortly after trial onset. *Human Brain Mapping*, *41*(1), 30-45. <https://doi.org/10.1002/hbm.24785>
- Becker, M., Wiedemann, G., & Kühn, S. (2020). Quantifying insightful problem solving : A modified compound remote associates paradigm using lexical priming to parametrically modulate different sources of task difficulty. *Psychological research*, *84*(2), 528-545.
- Beijamini, F., Pereira, S. I. R., Cini, F. A., & Louzada, F. M. (2014). After Being Challenged by a Video Game Problem, Sleep Increases the Chance to Solve It. *PLoS ONE*, *9*(1), e84342. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084342>

- Beijamini, F., Valentin, A., Jäger, R., Born, J., & Diekelmann, S. (2021). Sleep facilitates problem solving with no additional gain through targeted memory reactivation. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 30.
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Aichelburg, C., Levy, R., & Volle, E. (2017). Brain morphometry predicts individual creative potential and the ability to combine remote ideas. *Cortex*, 86, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.10.021>
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Garcin, B., Foulon, C., Levy, R., Bréchemier, M.-L., Rosso, C., Thiebaut de Schotten, M., & Volle, E. (2018). Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain*, 141(1), 217-233. <https://doi.org/10.1093/brain/awx294>
- Benedek, M., Bruckdorfer, R., & Jauk, E. (2020). Motives for creativity : Exploring the what and why of everyday creativity. *The Journal of Creative Behavior*, 54(3), 610-625.
- Benedek, M., & Jauk, E. (2018). Spontaneous and Controlled Processes in Creative Cognition. *The Oxford Handbook of Spontaneous Thought*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190464745.013.22>
- Benedek, M., Kenett, Y. N., & Umdasch, C. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, 23(2), 158-183.
- Benedek, M., Kenett, Y. N., Umdasch, K., Anaki, D., Faust, M., & Neubauer, A. C. (2017). How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought : A network science approach. *Thinking & Reasoning*, 23(2), 158-183. <https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1278034>
- 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. *The Journal of Creative Behavior*, 47(4), 273-289. <https://doi.org/10.1002/jocb.35>
- Bernard, M., Kenett, Y. N., Tellez, M. O., Benedek, M., & Volle, E. (2019). *Building individual semantic networks and exploring their relationships with creativity*. 138-144.
- Berry, R. B., Quan, S. F., & Abreu, A. (2020). *The AASM manual for the scoring of sleep and associated events rules, terminology and technical specifications* (Version 2.6). American Academy of Sleep Medicine.

- Bieth, T., Lopez-Persem, A., Ovando-Tellez, M., Urbanski, M., & Volle, E. (2021). Creativity. In E. Mandonnet & G. Herbet (Éds.), *Intraoperative Mapping of Cognitive Networks : Which Tasks for Which Locations* (p. 337-354). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75071-8_20
- Bieth, T., Ovando-Tellez, M., Bernard, M., & Volle, E. (2019). *Contribution des études lésionnelles aux neurosciences de la créativité*. *177*(2), 164-168.
- Bizzi, E., & Brooks, D. C. (1963). Pontine reticular formation : Relation to lateral geniculate nucleus during deep sleep. *Science*, *141*(3577), 270-272.
- Blanchette, I., & Dunbar, K. (2002). Representational change and analogy : How analogical inferences alter target representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*(4), 672-685. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.4.672>
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. (2006). Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, *424*(4-5), 175-308. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>
- Boccia, M., Piccardi, L., Palermo, L., Nori, R., & Palmiero, M. (2015). Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity. *Frontiers in Psychology*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01195>
- Bódizs, R., Sverteczki, M., & Mészáros, E. (2008). Wakefulness–sleep transition : Emerging electroencephalographic similarities with the rapid eye movement phase. *Brain Research Bulletin*, *76*(1-2), 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.11.013>
- Borge-Holthoefer, J., & Arenas, A. (2010). Semantic networks : Structure and dynamics. *Entropy*, *12*(5), 1264-1302.
- Born, J., & Wilhelm, I. (2012). System consolidation of memory during sleep. *Psychological research*, *76*(2), 192-203.
- Boroojerdi, B., Phipps, M., Kopylev, L., Wharton, C. M., Cohen, L. G., & Grafman, J. (2001). Enhancing analogic reasoning with rTMS over the left prefrontal cortex. *Neurology*, *56*(4), 526-528.
- Bowden, E. M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>

- Bressler, S. L., & Menon, V. (2010). Large-scale brain networks in cognition : Emerging methods and principles. *Trends in cognitive sciences*, 14(6), 277-290.
- Brodth, S., Pöhlchen, D., Täumer, E., Gais, S., & Schönauer, M. (2018). Incubation, not sleep, aids problem-solving. *Sleep*, 41(10). <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy155>
- Burnham, C. A., & Davis, K. G. (1969). The nine-dot problem : Beyond perceptual organization. *Psychonomic Science*, 17(6), 321-323.
- Buzsáki, G. (1989). Two-stage model of memory trace formation : A role for “noisy” brain states. *Neuroscience*, 31(3), 551-570.
- Buzsáki, G. (1998). Memory consolidation during sleep : A neurophysiological perspective. *Journal of sleep research*, 7(S1), 17-23.
- Cai, D. J., Mednick, S. A., Harrison, E. M., Kanady, J. C., & Mednick, S. C. (2009). REM, not incubation, improves creativity by priming associative networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10130-10134. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900271106>
- Canesi, M., Rusconi, M. L., Cereda, E., Ranghetti, A., Cereda, V., Moroni, F., & Pezzoli, G. (2017). Divergent Thinking in Parkinsonism : A Case–Control Study. *Frontiers in Neurology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00534>
- Carlsson, I., Davidson, P., & Ors, M. (2019). Effects of a Daytime Nap on Primed and Repeated Remote Associates Tests and Relations with Divergent Creativity. *Creativity Research Journal*, 31(2), 207-214. <https://doi.org/10.1080/10400419.2019.1606619>
- Carr, M., & Nielsen, T. (2015). Morning REM Sleep Naps Facilitate Broad Access to Emotional Semantic Networks. *Sleep*, 38(3), 433-443. <https://doi.org/10.5665/sleep.4504>
- Casagrande, M., Violani, C., Vereni, P., Lucidi, F., & Bertini, M. (1990). *A linguistic analysis of dream reports based on a cognitive-psycholinguistic model of dream production*. 10-th Congress of the European Sleep Research Society.
- Cassotti, M., Agogué, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to Adulthood : Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 2016(151), 61-72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>
- Catrambone, R. (1997). *Reinvestigating the effects of surface and structural features on analogical access*. 90-95.

- Cauzinille-Marmèche, É., Mathieu, J., & Weil-Barais, A. (1985). Raisonnement analogique et résolution de problèmes. *L'année psychologique*, *85*(1), 49-72.
- Chaumat, N., Etasse, C., Hauchemaille, J., Jech, B., Lobry, M., Maheu, B., & Thorez, D. (1989). *L'Analogie en Physique, Tome I: Exemple Historique. ROuen: IREM de Rouen, Book.*
- Chaumon, M., Puce, A., & George, N. (2021). Statistical power : Implications for planning MEG studies. *NeuroImage*, *233*, 117894.
- Christensen, A. P., Kenett, Y. N., Aste, T., Silvia, P. J., & Kwapil, T. R. (2018). Network structure of the Wisconsin Schizotypy Scales–Short Forms : Examining psychometric network filtering approaches. *Behavior Research Methods*, *50*(6), 2531-2550. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1032-9>
- Christoff, K., Irving, Z. C., Fox, K. C. R., Spreng, R. N., & Andrews-Hanna, J. R. (2016). Mind-wandering as spontaneous thought : A dynamic framework. *Nature Reviews Neuroscience*, *17*, 718.
- Christoff, K., Keramatian, K., Gordon, A. M., Smith, R., & Mädler, B. (2009). Prefrontal organization of cognitive control according to levels of abstraction. *Brain research*, *1286*, 94-105.
- Christoff, K., Prabhakaran, V., Dorfman, J., Zhao, Z., Kroger, J. K., Holyoak, K. J., & Gabrieli, J. D. (2001). Rostrolateral prefrontal cortex involvement in relational integration during reasoning. *Neuroimage*, *14*(5), 1136-1149.
- Chrysikou, E. G., Hamilton, R. H., Coslett, H. B., Datta, A., Bikson, M., & Thompson-Schill, S. L. (2013). Noninvasive transcranial direct current stimulation over the left prefrontal cortex facilitates cognitive flexibility in tool use. *Cognitive Neuroscience*, *4*(2), 81-89. <https://doi.org/10.1080/17588928.2013.768221>
- Chrysikou, E. G., Morrow, H. M., Flohrschutz, A., & Denney, L. (2021). Augmenting ideational fluency in a creativity task across multiple transcranial direct current stimulation montages. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-11.
- Chu, Y., & MacGregor, J. N. (2011). Human performance on insight problem solving : A review. *The Journal of Problem Solving*, *3*(2), 6.
- Cogdell-Brooke, L. S., Sowden, P. T., Violante, I. R., & Thompson, H. E. (2020). A meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies of divergent thinking using activation likelihood estimation. *Human Brain Mapping*, *41*(17), 5057-5077.

- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological review*, *82*(6), 407.
- Cona, G., Chiossi, F., Di Tomasso, S., Pellegrino, G., Piccione, F., Bisiacchi, P., & Arcara, G. (2020). Theta and alpha oscillations as signatures of internal and external attention to delayed intentions : A magnetoencephalography (MEG) study. *NeuroImage*, *205*, 116295.
- Cooper, N. R., Burgess, A. P., Croft, R. J., & Gruzelier, J. H. (2006). Investigating evoked and induced electroencephalogram activity in task-related alpha power increases during an internally directed attention task. *Neuroreport*, *17*(2), 205-208.
- Coutanche, M. N., Gianessi, C. A., Chanales, A. J. H., Willison, K. W., & Thompson-Schill, S. L. (2013). The role of sleep in forming a memory representation of a two-dimensional space : Two-Dimensional Representations and Sleep. *Hippocampus*, *23*(12), 1189-1197. <https://doi.org/10.1002/hipo.22157>
- Craig, M., Ottaway, G., & Dewar, M. (2018). Rest on it : Awake quiescence facilitates insight. *Cortex*, *109*, 205-214.
- Creery, J. D., Brang, D. J., Arndt, J. D., Bassard, A., Towle, V. L., Tao, J. X., Wu, S., Rose, S., Warnke, P. C., & Issa, N. (2022). Electrophysiological Markers of Memory Consolidation in the Human Brain when Memories are Reactivated during Sleep. *bioRxiv*.
- Cropley, A. (2006). In praise of convergent thinking. *Creativity research journal*, *18*(3), 391-404.
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2012). Cues to solution, restructuring patterns, and reports of insight in creative problem solving. *Consciousness and Cognition*, *21*(3), 1166-1175. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2012.03.013>
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2018). Both attentional control and the ability to make remote associations aid spontaneous analogical transfer. *Memory & cognition*, *46*(8), 1398-1412.
- Danek, A. H., Williams, J., & Wiley, J. (2020). Closing the gap : Connecting sudden representational change to the subjective Aha! experience in insightful problem solving. *Psychological Research*, *84*(1), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-0977-8>
- Danko, S. G., Shemyakina, N. V., Nagornova, Zh. V., & Starchenko, M. G. (2009). Comparison of the effects of the subjective complexity and verbal creativity on EEG spectral power

- parameters. *Human Physiology*, 35(3), 381-383.
<https://doi.org/10.1134/S0362119709030153>
- Davis, M. A. (2009). Understanding the relationship between mood and creativity : A meta-analysis. *Organizational behavior and human decision processes*, 108(1), 25-38.
- De Deyne, S., Kenett, Y. N., Anaki, D., Faust, M., & Navarro, D. (2017). *Large-scale network representations of semantics in the mental lexicon*.
- De Dreu, C. K. W., Nijstad, B. A., Baas, M., Wolsink, I., & Roskes, M. (2012). Working Memory Benefits Creative Insight, Musical Improvisation, and Original Ideation Through Maintained Task-Focused Attention. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 38(5), 656-669. <https://doi.org/10.1177/0146167211435795>
- De Vico Fallani, F., Richiardi, J., Chavez, M., & Achard, S. (2014). Graph analysis of functional brain networks : Practical issues in translational neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1653), 20130521. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0521>
- Debarnot, U., Rossi, M., Faraguna, U., Schwartz, S., & Sebastiani, L. (2017). Sleep does not facilitate insight in older adults. *Neurobiology of Learning and Memory*, 140, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2017.02.005>
- Debrenne, M. (2011). Le dictionnaire des associations verbales du français et ses applications. *Variétés, variations and formes du français. Palaiseau: Éditions de l'École polytechnique*, 355-366.
- Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *Journal of experimental psychology*, 58(1), 17.
- Dehaene, S. (2016). Psychologie cognitive expérimentale. *L'annuaire du Collège de France. Cours et travaux*, 115, 335-356.
- Deperrois, N., Petrovici, M. A., Senn, W., & Jordan, J. (2022). Learning cortical representations through perturbed and adversarial dreaming. *ELife*, 11, e76384. <https://doi.org/10.7554/eLife.76384>
- de Souza, L. C., Guimarães, H. C., Teixeira, A. L., Caramelli, P., Levy, R., Dubois, B., & Volle, E. (2014). Frontal lobe neurology and the creative mind. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00761>
- Diekelmann, S., Born, J., & Wagner, U. (2010). Sleep enhances false memories depending on general memory performance. *Behavioural brain research*, 208(2), 425-429.

- Diekelmann, S., Landolt, H.-P., Lahl, O., Born, J., & Wagner, U. (2008). Sleep loss produces false memories. *PloS one*, 3(10), e3512.
- Dietrich, A. (2004). The cognitive neuroscience of creativity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(6), 1011-1026.
- Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, 136(5), 822-848. <https://doi.org/10.1037/a0019749>
- Dinges, D. F. (1990). *Are you awake? Cognitive performance and reverie during the hypnopompic state.*
- Djonlagic, I., Rosenfeld, A., Shohamy, D., Myers, C., Gluck, M., & Stickgold, R. (2009). Sleep enhances category learning. *Learning & memory*, 16(12), 751-755.
- Dubey, R., Ho, M. K., Mehta, H., & Griffiths, T. (2021). Aha ! Moments correspond to meta-cognitive prediction errors. *PsyArXiv*. June, 22.
- Dudai, Y. (2012). The restless engram : Consolidations never end. *Annual review of neuroscience*, 35(1), 227-247.
- Duff, M. C., Kurczek, J., Rubin, R., Cohen, N. J., & Tranel, D. (2013). Hippocampal amnesia disrupts creative thinking : Creative Thinking and the Hippocampus. *Hippocampus*, 23(12), 1143-1149. <https://doi.org/10.1002/hipo.22208>
- Dunbar, K., & Fugelsang, J. (2005). Scientific thinking and reasoning. *The Cambridge handbook of thinking and reasoning*, 705-725.
- Duncker, K., & Lees, L. S. (1945). On problem-solving. *Psychological monographs*, 58(5), i.
- Durrant, S. J., Cairney, S. A., McDermott, C., & Lewis, P. A. (2015). Schema-conformant memories are preferentially consolidated during REM sleep. *Neurobiology of Learning and Memory*, 122, 41-50.
- Durso, F. T., Rea, C. B., & Dayton, T. (1994). Graph-Theoretic Confirmation of Restructuring During Insight. *Psychological Science*, 5(2), 94-98. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1994.tb00637.x>
- Eckert, M. A., Menon, V., Walczak, A., Ahlstrom, J., Denslow, S., Horwitz, A., & Dubno, J. R. (2009). At the heart of the ventral attention system : The right anterior insula. *Human brain mapping*, 30(8), 2530-2541.

- Edl, S., Benedek, M., Papousek, I., Weiss, E. M., & Fink, A. (2014). Creativity and the Stroop interference effect. *Personality and Individual Differences, 69*, 38-42. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.05.009>
- Edwards, C. L., Ruby, P. M., Malinowski, J. E., Bennett, P. D., & Blagrove, M. T. (2013). Dreaming and insight. *Frontiers in Psychology, 4*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00979>
- Ego-Stengel, V., & Wilson, M. A. (2010). Disruption of ripple-associated hippocampal activity during rest impairs spatial learning in the rat. *Hippocampus, 20*(1), 1-10.
- Ellamil, M., Dobson, C., Beeman, M., & Christoff, K. (2012). Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *NeuroImage, 59*(2), 1783-1794. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.008>
- Feld, G. B., & Diekelmann, S. (2015). Sleep smart-optimizing sleep for declarative learning and memory. *Frontiers in Psychology, 6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00622>
- Fenn, K. M., Gallo, D. A., Margoliash, D., Roediger, H. L., & Nusbaum, H. C. (2009). Reduced false memory after sleep. *Learning & memory, 16*(9), 509-513.
- Fink, A., & Benedek, M. (2014). EEG alpha power and creative ideation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 44*, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.12.002>
- Fink, A., Grabner, R. H., Benedek, M., Reishofer, G., Hauswirth, V., Fally, M., Neuper, C., Ebner, F., & Neubauer, A. C. (2009). The creative brain : Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and FMRI. *Human Brain Mapping, 30*(3), 734-748. <https://doi.org/10.1002/hbm.20538>
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2006). EEG alpha oscillations during the performance of verbal creativity tasks : Differential effects of sex and verbal intelligence. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 62*(1), 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.01.001>
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative cognition : Theory, research, and applications*.
- Fischer, C., Malycha, C. P., & Schafmann, E. (2019). The influence of intrinsic motivation and synergistic extrinsic motivators on creativity and innovation. *Frontiers in psychology, 10*, 137.
- Foulkes, D. (1964). Theories of dream formation and recent studies of sleep consciousness. *Psychological Bulletin, 62*(4), 236.

- Foulon, C., Cerliani, L., Kinkingnéhun, S., Levy, R., Rosso, C., Urbanski, M., Volle, E., & Thiebaut de Schotten, M. (2018). Advanced lesion symptom mapping analyses and implementation as BCBtoolkit. *GigaScience*, 7(3). <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy004>
- Frith, E., Elbich, D. B., Christensen, A. P., Rosenberg, M. D., Chen, Q., Kane, M. J., Silvia, P. J., Seli, P., & Beaty, R. E. (2021). Intelligence and creativity share a common cognitive and neural basis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 150(4), 609.
- Gamo, S., Nogry, S., & Sander, E. (2014a). Apprendre à résoudre des problèmes en favorisant la construction d'une représentation alternative chez des élèves scolarisés en éducation prioritaire. *Psychologie française*, 59(3), 215-229.
- Gamo, S., Nogry, S., & Sander, E. (2014b). Réduire les effets de contenus en résolution de problèmes pour favoriser la construction d'une représentation alternative. *Cahiers des Sciences de l'Éducation—Université de Liège (aSPe)*, 36, 35.
- Gamo, S., Sander, E., & Richard, J.-F. (2010). Transfer of strategy use by semantic recoding in arithmetic problem solving. *Learning and Instruction*, 20(5), 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.04.001>
- Garner, R. (2005). Humor, analogy, and metaphor : HAM it up in teaching. *Radical Pedagogy*.
- Gentner, D. (1983). Structure-Mapping : A Theoretical Framework for Analogy*. *Cognitive Science*, 7(2), 155-170. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3
- Gentner, D. (2005). The development of relational category knowledge. In *Building object categories in developmental time* (p. 263-294). Psychology Press.
- Gentner, D., & Colhoun, J. (2010). Analogical processes in human thinking and learning. In *Towards a theory of thinking* (p. 35-48). Springer.
- Gentner, D., & Goldin-Meadow, S. (2003). *Language in mind : Advances in the study of language and thought*.
- Gentner, D., & Holyoak, K. J. (1997). Reasoning and learning by analogy : Introduction. *American Psychologist*, 52(1), 32-34. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.52.1.32>
- Gentner, D., & Medina, J. (1998). Similarity and the development of rules. *Cognition*, 65(2-3), 263-297.
- Gentner, D., Rattermann, M. J., & Forbus, K. D. (1993). The roles of similarity in transfer : Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25(4), 524-575. <https://doi.org/10.1006/cogp.1993.1013>

- George, T., & Wiley, J. (2018). Breaking past the surface : Remote analogical transfer as creative insight. *Insight*, 143-168.
- Ghacibeh, G. A., & Heilman, K. M. (2013). Creative innovation with temporal lobe epilepsy and lobectomy. *Journal of the Neurological Sciences*, 324(1-2), 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2012.09.029>
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12(3), 306-355. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90013-4)
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive psychology*, 15(1), 1-38.
- Giovagnoli, A. R. (2020). The contribution of the frontal lobe to creativity. Insights from epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 111, 107313. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2020.107313>
- Girardeau, G., Benchenane, K., Wiener, S. I., Buzsáki, G., & Zugaro, M. B. (2009). Selective suppression of hippocampal ripples impairs spatial memory. *Nature neuroscience*, 12(10), 1222-1223.
- Girardeau, G., & Lopes-dos-Santos, V. (2021). Brain neural patterns and the memory function of sleep. *Science*, 374(6567), 560-564. <https://doi.org/10.1126/science.abi8370>
- Giuditta, A. (2014). Sleep memory processing : The sequential hypothesis. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00219>
- Gonen-Yaacovi, G., de Souza, L. C., Levy, R., Urbanski, M., Josse, G., & Volle, E. (2013). Rostral and caudal prefrontal contribution to creativity : A meta-analysis of functional imaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 465. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00465>
- Goñi, J., Arrondo, G., Sepulcre, J., Martincorena, I., Vélez de Mendizábal, N., Corominas-Murtra, B., Bejarano, B., Ardanza-Trevijano, S., Peraita, H., Wall, D. P., & Villoslada, P. (2011). The semantic organization of the animal category : Evidence from semantic verbal fluency and network theory. *Cognitive Processing*, 12(2), 183-196. <https://doi.org/10.1007/s10339-010-0372-x>
- Gott, J. A., Liley, D. T., & Hobson, J. A. (2017). Towards a functional understanding of PGO waves. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 89.
- Grandjean, M. (2014). La connaissance est un réseau. *Les cahiers du numérique*, 10(3), 37-54.

- Green, A. E. (2016). Creativity, within reason : Semantic distance and dynamic state creativity in relational thinking and reasoning. *Current Directions in Psychological Science*, 25(1), 28-35.
- Green, A. E., Kraemer, D. J. M., Fugelsang, J. A., Gray, J. R., & Dunbar, K. N. (2010). Connecting long distance : Semantic distance in analogical reasoning modulates frontopolar cortex activity. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 20(1), 70-76. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp081>
- Green, A. E., Kraemer, D. J. M., Fugelsang, J. A., Gray, J. R., & Dunbar, K. N. (2012). Neural correlates of creativity in analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(2), 264-272. <https://doi.org/10.1037/a0025764>
- Green, A. E., Spiegel, K. A., Giangrande, E. J., Weinberger, A. B., Gallagher, N. M., & Turkeltaub, P. E. (2017). Thinking cap plus thinking zap : TDCS of frontopolar cortex improves creative analogical reasoning and facilitates conscious augmentation of state creativity in verb generation. *Cerebral Cortex*, 27(4), 2628-2639.
- Gros, H., Thibaut, J.-P., & Sander, E. (2015). *Robustness of semantic encoding effects in a transfer task for multiple-strategy arithmetic problems*. CogSci.
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5(9), 444-454. <https://doi.org/10.1037/h0063487>
- Guilford, J. P. (1967). Creativity : Yesterday, Today and Tomorrow. *The Journal of Creative Behavior*, 1(1), 3-14. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1967.tb00002.x>
- Haarmann, H. J., George, T., Smaliy, A., & Dien, J. (2012). Remote Associates Test and Alpha Brain Waves. *The Journal of Problem Solving*, 4(2). <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1126>
- Hartogsveld, B., Bramson, B., Vijayakumar, S., van Campen, A. D., Marques, J. P., Roelofs, K., Toni, I., Bekkering, H., & Mars, R. B. (2018). Lateral frontal pole and relational processing : Activation patterns and connectivity profile. *Behavioural Brain Research*, 355, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2017.08.003>
- Hasselmo, M. E. (1999). Neuromodulation : Acetylcholine and memory consolidation. *Trends in cognitive sciences*, 3(9), 351-359.
- He, L., Kenett, Y. N., Zhuang, K., Liu, C., Zeng, R., Yan, T., Huo, T., & Qiu, J. (2021). The relation between semantic memory structure, associative abilities, and verbal and figural

- creativity. *Thinking & Reasoning*, 27(2), 268-293.
<https://doi.org/10.1080/13546783.2020.1819415>
- Helfrich, R. F., Mander, B. A., Jagust, W. J., Knight, R. T., & Walker, M. P. (2018). Old Brains Come Uncoupled in Sleep : Slow Wave-Spindle Synchrony, Brain Atrophy, and Forgetting. *Neuron*, 97(1), 221-230.e4. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.11.020>
- Helfrich, R. F., Schneider, T. R., Rach, S., Trautmann-Lengsfeld, S. A., Engel, A. K., & Herrmann, C. S. (2014). Entrainment of Brain Oscillations by Transcranial Alternating Current Stimulation. *Current Biology*, 24(3), 333-339.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.12.041>
- Hills, T. T., & Kenett, Y. N. (2021). Networks of the Mind : How Can Network Science Elucidate Our Understanding of Cognition? *Topics in Cognitive Science*.
- Hobeika, L., Diard-Detoeuf, C., Garcin, B., Levy, R., & Volle, E. (2016). General and specialized brain correlates for analogical reasoning : A meta-analysis of functional imaging studies. *Human Brain Mapping*, 37(5), 1953-1969.
<https://doi.org/10.1002/hbm.23149>
- Hobson, J. A. (1997). *Dreaming as delirium : A mental status analysis of our nightly madness*. 17(02), 121-128.
- Hobson, J. A., & Friston, K. J. (2012). Waking and dreaming consciousness : Neurobiological and functional considerations. *Progress in neurobiology*, 98(1), 82-98.
- Hobson, J. A., & Pace-Schott, E. F. (2002). The cognitive neuroscience of sleep : Neuronal systems, consciousness and learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(9), 679-693.
<https://doi.org/10.1038/nrn915>
- Hobson, J. A., Pace-Schott, E. F., & Stickgold, R. (2000). Dreaming and the brain : Toward a cognitive neuroscience of conscious states. *Behavioral and brain sciences*, 23(6), 793-842.
- Hobson, J. A., & Stickgold, R. (1994). Dreaming : A neurocognitive approach. *Consciousness and Cognition*, 3(1), 1-15.
- Hoedlmoser, K., Peigneux, P., & Rauchs, G. (2022). Recent advances in memory consolidation and information processing during sleep. *Journal of sleep research*.
- Hofstadter, D., & Sander, E. (2013). *L'analogie, cœur de la pensée*. Odile Jacob.

- Hołda, M., Głodek, A., Dankiewicz-Berger, M., Skrzypińska, D., & Szmigielska, B. (2020). Ill-defined problem solving does not benefit from daytime napping. *Frontiers in psychology, 11*, 559.
- Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & cognition, 15*(4), 332-340.
- Holyoak, K. J., & Monti, M. M. (2021). Relational Integration in the Human Brain : A Review and Synthesis. *Journal of Cognitive Neuroscience, 33*(3), 341-356. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01619
- Holyoak, K. J., & Morrison, R. G. (2012). *The Oxford handbook of thinking and reasoning*. Oxford University Press.
- Holyoak, K. J., Thagard, P., & Sutherland, S. (1995). Mental leaps : Analogy in creative thought. *Nature, 373*(6515), 572-572.
- Hu, X., Cheng, L. Y., Chiu, M. H., & Paller, K. A. (2020). Promoting memory consolidation during sleep : A meta-analysis of targeted memory reactivation. *Psychological bulletin, 146*(3), 218.
- Ichien, N., Lu, H., & Holyoak, K. J. (2020). Verbal analogy problem sets : An inventory of testing materials. *Behavior Research Methods, 52*(5), 1803-1816. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01312-3>
- Jauk, E., Benedek, M., & Neubauer, A. C. (2012). Tackling creativity at its roots : Evidence for different patterns of EEG alpha activity related to convergent and divergent modes of task processing. *International Journal of Psychophysiology, 84*(2), 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.02.012>
- Jilka, S. R., Scott, G., Ham, T., Pickering, A., Bonnelle, V., Braga, R. M., Leech, R., & Sharp, D. J. (2014). Damage to the salience network and interactions with the default mode network. *Journal of neuroscience, 34*(33), 10798-10807.
- Jouvet, M., Michel, F., & Courjon, J. (1959). Sur un stade d'activité électrique cérébrale rapide au cours du sommeil physiologique. *CR Soc Biol, 153*, 1024-1028.
- Jung, R. E. (2013). The structure of creative cognition in the human brain. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00330>
- Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., Reber, P. J., & Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biology, 2*(4), E97. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020097>

- Kaplan, C. A., & Simon, H. A. (1990). In search of insight. *Cognitive psychology*, 22(3), 374-419.
- Karwowski, M., Zielińska, A., Jankowska, D. M., Strutyńska, E., Omelańczuk, I., & Lebeda, I. (2021). Creative lockdown ? A daily diary study of creative activity during pandemics. *Frontiers in psychology*, 12, 600076.
- Kenett, Y. N. (2019). What can quantitative measures of semantic distance tell us about creativity? *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.010>
- Kenett, Y. N., Anaki, D., & Faust, M. (2014). Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00407>
- Kenett, Y. N., & Faust, M. (2019). A Semantic Network Cartography of the Creative Mind. *Trends in Cognitive Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.01.007>
- Kenett, Y. N., Kenett, D. Y., Ben-Jacob, E., & Faust, M. (2011). Global and Local Features of Semantic Networks : Evidence from the Hebrew Mental Lexicon. *PLoS ONE*, 6(8), e23912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023912>
- Kenett, Y. N., Levi, E., Anaki, D., & Faust, M. (2017). The semantic distance task : Quantifying semantic distance with semantic network path length. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(9), 1470.
- Kenett, Y., & Thompson-Schill, S. L. (2020). *Novel conceptual combination can dynamically reconfigure semantic memory networks*.
- Kleinmintz, O. M., Abecasis, D., Tauber, A., Geva, A., Chistyakov, A. V., Kreinin, I., Klein, E., & Shamay-Tsoory, S. G. (2018). Participation of the left inferior frontal gyrus in human originality. *Brain Structure and Function*, 223(1), 329-341. <https://doi.org/10.1007/s00429-017-1500-5>
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations : The inhibition–timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, 53(1), 63-88. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.06.003>
- Klinzing, J. G., Niethard, N., & Born, J. (2019). Mechanisms of systems memory consolidation during sleep. *Nature neuroscience*, 22(10), 1598-1610.

- Knoblich, G., & Haider, H. (2019). *Empirical evidence for constraint relaxation in insight problem solving*. 580-585.
- Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. (1999). Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and cognition*, 25(6), 1534.
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399(6732), 148-151.
- Konkoly, K. R., Appel, K., Chabani, E., Mangiaruga, A., Gott, J., Mallett, R., Caughran, B., Witkowski, S., Whitmore, N. W., Mazurek, C. Y., Berent, J. B., Weber, F. D., Türker, B., Leu-Semenescu, S., Maranci, J.-B., Pipa, G., Arnulf, I., Oudiette, D., Dresler, M., & Paller, K. A. (2021). Real-time dialogue between experimenters and dreamers during REM sleep. *Current Biology*, 31(7), 1417-1427.e6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.01.026>
- Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The cognitive neuroscience of insight. *Annual Review of Psychology*, 65, 71-93. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>
- Krawczyk. (2010). Deficits in analogical reasoning in adolescents with traumatic brain injury. *Frontiers in Human Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00062>
- Krawczyk, D. C. (2012). The cognition and neuroscience of relational reasoning. *Brain Research*, 1428, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.11.080>
- Krawczyk, D. C., Michelle McClelland, M., & Donovan, C. M. (2011). A hierarchy for relational reasoning in the prefrontal cortex. *Cortex*, 47(5), 588-597. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.04.008>
- Kroger, J. K., Sabb, F. W., Fales, C. L., Bookheimer, S. Y., Cohen, M. S., & Holyoak, K. J. (2002). Recruitment of anterior dorsolateral prefrontal cortex in human reasoning: A parametric study of relational complexity. *Cerebral cortex*, 12(5), 477-485.
- Kryger, M. H., Roth, T., & Goldstein, C. A. (2021). *Kryger's Principles and Practice of Sleep Medicine*. Elsevier Health Sciences.
- Kuang, C., Chen, J., Chen, J., Shi, Y., Huang, H., Jiao, B., Lin, Q., Rao, Y., Liu, W., Zhu, Y., Mo, L., Ma, L., & Lin, J. (2022). Uncovering neural distinctions and commodities between two creativity subsets: A meta-analysis of fMRI studies in divergent thinking and insight using activation likelihood estimation. *Human Brain Mapping*, hbm.26029. <https://doi.org/10.1002/hbm.26029>

- Kumar, A. A. (2021). Semantic memory : A review of methods, models, and current challenges. *Psychonomic Bulletin & Review*, 28(1), 40-80. <https://doi.org/10.3758/s13423-020-01792-x>
- Kurdziel, L., Duclos, K., & Spencer, R. M. (2013). Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), 17267-17272.
- Kurtz, K. J., & Loewenstein, J. (2007). Converging on a new role for analogy in problem solving and retrieval : When two problems are better than one. *Memory & cognition*, 35(2), 334-341.
- Lacaux, C. (2021). *The borderland between wakefulness and sleep, a doorway into creativity*.
- Lacaux, C., Andrillon, T., Bastoul, C., Idir, Y., Fonteix-Galet, A., Arnulf, I., & Oudiette, D. (2021). Sleep onset is a creative sweet spot. *Science Advances*, 7(50), eabj5866.
- Lacaux, C., Isabelle, C., Santantonio, G., De Villèle, L., Frain, J., Lubart, T., Pizza, F., Plazzi, G., Arnulf, I., & Oudiette, D. (2019). Increased creative thinking in narcolepsy. *Brain*, 142(7), 1988-1999.
- Landauer, T. K., & Dumais, S. T. (1997). A solution to Plato's problem : The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. *Psychological review*, 104(2), 211.
- Landauer, T. K., Foltz, P. W., & Laham, D. (1998). An introduction to latent semantic analysis. *Discourse Processes*, 25(2-3), 259-284. <https://doi.org/10.1080/01638539809545028>
- Landmann, N., Kuhn, M., Maier, J.-G., Feige, B., Spiegelhalder, K., Riemann, D., & Nissen, C. (2016). Sleep Strengthens but does Not Reorganize Memory Traces in a Verbal Creativity Task. *Sleep*, 39(3), 705-713. <https://doi.org/10.5665/sleep.5556>
- Landmann, N., Kuhn, M., Piosczyk, H., Feige, B., Baglioni, C., Spiegelhalder, K., Frase, L., Riemann, D., Sterr, A., & Nissen, C. (2014). The reorganisation of memory during sleep. *Sleep medicine reviews*, 18(6), 531-541.
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19), 198701.
- Lau, H., Alger, S. E., & Fishbein, W. (2011). Relational Memory : A Daytime Nap Facilitates the Abstraction of General Concepts. *PLoS ONE*, 6(11), e27139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027139>

- Lau, H., Tucker, M. A., & Fishbein, W. (2010). Daytime napping : Effects on human direct associative and relational memory. *Neurobiology of Learning and Memory*, 93(4), 554-560. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.02.003>
- Laukkonen, R. E., Ingledew, D. J., Grimmer, H. J., Schooler, J. W., & Tangen, J. M. (2021). Getting a grip on insight : Real-time and embodied Aha experiences predict correct solutions. *Cognition & Emotion*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/02699931.2021.1908230>
- Laukkonen, R. E., & Tangen, J. M. (2018). How to detect insight moments in problem solving experiments. *Frontiers in psychology*, 9, 282.
- Lee, C. S., & Therriault, D. J. (2013). The cognitive underpinnings of creative thought : A latent variable analysis exploring the roles of intelligence and working memory in three creative thinking processes. *Intelligence*, 41(5), 306-320. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.04.008>
- Lewis, P. A., & Durrant, S. J. (2011). Overlapping memory replay during sleep builds cognitive schemata. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(8), 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.06.004>
- Lewis, P. A., Knoblich, G., & Poe, G. (2018). How Memory Replay in Sleep Boosts Creative Problem-Solving. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(6), 491-503. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.009>
- Llewellyn, S., & Hobson, J. A. (2015). Not only... but also : REM sleep creates and NREM Stage 2 instantiates landmark junctions in cortical memory networks. *Neurobiology of learning and memory*, 122, 69-87.
- Lopez-Persem, A., Bieth, T., Guiet, S., Ovando-Tellez, M., & Volle, E. (2022). Through thick and thin : Changes in creativity during the first lockdown of the Covid-19 pandemic. *Frontiers in psychology*, 13.
- Lopez-Persem, A., Rodriguez, S. M., Ovando-Tellez, M., Bieth, T., Guiet, S., Brochard, J., & Volle, E. (2022). How subjective idea valuation energizes and guides creative idea generation. *bioRxiv*.
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *EPOC: évaluation du potentiel créatif*. Hogrefe.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., & Zenasni, F. (2015). *Psychologie de la créativité-2e édition*. Armand Colin.

- Lubart, T., Zenasni, F., & Barbot, B. (2013). Creative potential and its measurement. *International Journal for Talent Development and Creativity*, 1(2), 41-51.
- Luft, C. D. B., Zioga, I., Banissy, M. J., & Bhattacharya, J. (2017). Relaxing learned constraints through cathodal tDCS on the left dorsolateral prefrontal cortex. *Scientific Reports*, 7(1), 2916. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03022-2>
- Luft, C. D. B., Zioga, I., Thompson, N. M., Banissy, M. J., & Bhattacharya, J. (2018). Right temporal alpha oscillations as a neural mechanism for inhibiting obvious associations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), E12144-E12152. <https://doi.org/10.1073/pnas.1811465115>
- Luger, G. F., & Bauer, M. A. (1978). Transfer effects in isomorphic problem situations. *Acta Psychologica*, 42(2), 121-131. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90011-2)
- Lung, C.-T., & Dominowski, R. L. (1985). Effects of strategy instructions and practice on nine-dot problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 11(4), 804.
- Lustenberger, C., Boyle, M. R., Foulser, A. A., Mellin, J. M., & Fröhlich, F. (2015). Functional role of frontal alpha oscillations in creativity. *Cortex*, 67, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.03.012>
- MacGregor, J. N., Ormerod, T. C., & Chronicle, E. P. (2001). Information processing and insight : A process model of performance on the nine-dot and related problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(1), 176.
- Maingret, N., Girardeau, G., Todorova, R., Goutierre, M., & Zugaro, M. (2016). Hippocampocortical coupling mediates memory consolidation during sleep. *Nature neuroscience*, 19(7), 959-964.
- Malinowski, J. E., & Horton, C. L. (2021). Dreams reflect nocturnal cognitive processes : Early-night dreams are more continuous with waking life, and late-night dreams are more emotional and hyperassociative. *Consciousness and Cognition*, 88, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.103071>
- Mamelak, A. N., & Hobson, J. A. (1989). Dream bizarreness as the cognitive correlate of altered neuronal behavior in REM sleep. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(3), 201-222.
- Mantua, J. (2018). Sleep physiology correlations and human memory consolidation : Where do we go from here? *Sleep*, 41(2), zsx204.

- Markman, A. B., & Gentner, D. (2000). Structure mapping in the comparison process. *American Journal of Psychology*, *113*(4), 501-538.
- 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.
- Mastria, S., Agnoli, S., Zanon, M., Acar, S., Runco, M. A., & Corazza, G. E. (2021). Clustering and switching in divergent thinking : Neurophysiological correlates underlying flexibility during idea generation. *Neuropsychologia*, *158*, 107890.
- Mazzarello, P. (2000). What dreams may come? *Nature*, *408*(6812), 523-523.
- McKeon, S., Pace-Schott, E. F., & Spencer, R. M. C. (2012). Interaction of Sleep and Emotional Content on the Production of False Memories. *PLoS ONE*, *7*(11), e49353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049353>
- Mednick, M. T., Mednick, S. A., & Jung, C. C. (1964). Continual association as a function of level of creativity and type of verbal stimulus. *Journal of Abnormal Psychology*, *69*, 511-515.
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, *69*, 220-232.
- Mercier, M., Vinchon, F., Pichot, N., Bonetto, E., Bonnardel, N., Girandola, F., & Lubart, T. (2021). COVID-19 : A Boon or a Bane for Creativity? *Frontiers in psychology*, *11*, 601150.
- Mikutta, C., Feige, B., Maier, J. G., Hertenstein, E., Holz, J., Riemann, D., & Nissen, C. (2019). Phase-amplitude coupling of sleep slow oscillatory and spindle activity correlates with overnight memory consolidation. *Journal of Sleep Research*, *28*(6). <https://doi.org/10.1111/jsr.12835>
- Möller, M., Bergmann, T. O., Marshall, L., & Born, J. (2011). Fast and Slow Spindles during the Sleep Slow Oscillation : Disparate Coalescence and Engagement in Memory Processing. *Sleep*, *34*(10), 1411-1421. <https://doi.org/10.5665/SLEEP.1290>
- Möller, M., Marshall, L., Lutzenberger, W., Pietrowsky, R., Fehm, H. L., & Born, J. (1996). Enhanced dynamic complexity in the human EEG during creative thinking. *Neuroscience Letters*, *208*(1), 61-64.
- Monaghan, P., Sio, U. N., Lau, S. W., Woo, H. K., Linkenauger, S. A., & Ormerod, T. C. (2015). Sleep promotes analogical transfer in problem solving. *Cognition*, *143*, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.06.005>

- Morais, A. S., Olsson, H., & Schooler, L. J. (2013). Mapping the Structure of Semantic Memory. *Cognitive Science*, 37(1), 125-145. <https://doi.org/10.1111/cogs.12013>
- Morrison, R. G., Krawczyk, D. C., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T. W., Miller, B. L., & Knowlton, B. J. (2004). A neurocomputational model of analogical reasoning and its breakdown in frontotemporal lobar degeneration. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(2), 260-271.
- Muehlroth, B. E., Sander, M. C., Fandakova, Y., Grandy, T. H., Rasch, B., Shing, Y. L., & Werkle-Bergner, M. (2019). Precise Slow Oscillation–Spindle Coupling Promotes Memory Consolidation in Younger and Older Adults. *Scientific Reports*, 9(1), 1940. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36557-z>
- Mumford, M. D., Mobley, M. I., Reiter-Palmon, R., Uhlman, C. E., & Doares, L. M. (1991). Process analytic models of creative capacities. *Creativity Research Journal*, 4(2), 91-122. <https://doi.org/10.1080/10400419109534380>
- Nemeth, D., Gerbier, E., Born, J., Rickard, T., Albouy, G., Diekelman, S., Fogel, S., Genzel, L., Prehn-Kristensen, A., & Payne, J. (2021). *Pitfalls in sleep and memory research and how to avoid them : A consensus paper*.
- Newbury, C. R., & Monaghan, P. (2019). When does sleep affect veridical and false memory consolidation ? A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(2), 387-400.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving* (Vol. 104, Numéro 9). Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ.
- Newman, M. E. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 103(23), 8577-8582.
- Nielsen, T. A. (2000). A review of mentation in REM and NREM sleep : “Covert” REM sleep as a possible reconciliation of two opposing models. *Behavioral and Brain Sciences*, 23(6), 851-866. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0000399X>
- Nieuwenhuis, I. L. C., Folia, V., Forkstam, C., Jensen, O., & Petersson, K. M. (2013). Sleep Promotes the Extraction of Grammatical Rules. *PLoS ONE*, 8(6), e65046. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065046>
- Noonan, K. A., Jefferies, E., Visser, M., & Lambon Ralph, M. A. (2013). Going beyond inferior prefrontal involvement in semantic control : Evidence for the additional contribution of dorsal angular gyrus and posterior middle temporal cortex. *Journal of cognitive neuroscience*, 25(11), 1824-1850.

- Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14(3), 510-520. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.14.3.510>
- Novick, L. R., & Holyoak, K. J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of experimental psychology: Learning, memory, and cognition*, 17(3), 398.
- Oh, Y., Chesebrough, C., Erickson, B., Zhang, F., & Kounios, J. (2020). An insight-related neural reward signal. *NeuroImage*, 214, 116757.
- Ohlsson, S. (1984). Restructuring revisited: II. An information processing theory of restructuring and insight. *Scandinavian journal of psychology*, 25(2), 117-129.
- Ohlsson, S. (1990). *The mechanism of restructuring in geometry*. PITTSBURGH UNIV PA LEARNING RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER.
- Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the psychology of thinking*, 1, 1-44.
- Ólafsdóttir, H. F., Bush, D., & Barry, C. (2018). The role of hippocampal replay in memory and planning. *Current Biology*, 28(1), R37-R50.
- Oldham, S., Fulcher, B., Parkes, L., Arnatkevičiūtė, A., Suo, C., & Fornito, A. (2019). Consistency and differences between centrality measures across distinct classes of networks. *PLOS ONE*, 14(7), e0220061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220061>
- Öllinger, M., Jones, G., & Knoblich, G. (2014). The dynamics of search, impasse, and representational change provide a coherent explanation of difficulty in the nine-dot problem. *Psychological research*, 78(2), 266-275.
- Oltețeanu, A.-M., & Zunjani, F. H. (2020). A visual remote associates test and its validation. *Frontiers in psychology*, 11, 26.
- O'Neill, J., Pleydell-Bouverie, B., Dupret, D., & Csicsvari, J. (2010). Play it again : Reactivation of waking experience and memory. *Trends in neurosciences*, 33(5), 220-229.
- Oudiette, D., & Paller, K. A. (2013). Upgrading the sleeping brain with targeted memory reactivation. *Trends in cognitive sciences*, 17(3), 142-149.
- Ovando-Tellez, M., Benedek, M., Kenett, Y. N., Hills, T., Bouanane, S., Bernard, M., Belo, J., Bieth, T., & Volle, E. (2022). An investigation of the cognitive and neural correlates of semantic memory search related to creative ability. *Communications biology*, 5(1), 1-16.

- Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., Bieth, T., & Volle, E. (2022). Brain connectivity–based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eabl4294. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4294>
- Ovando-Tellez, M. P., Bieth, T., Bernard, M., & Volle, E. (2019). The contribution of the lesion approach to the neuroscience of creative cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.10.011>
- Paller, K. A., Creery, J. D., & Schechtman, E. (2021). Memory and sleep : How sleep cognition can change the waking mind for the better. *Annual review of psychology*, 72(1).
- Pan, S. C., & Rickard, T. C. (2015). Sleep and motor learning : Is there room for consolidation? *Psychological bulletin*, 141(4), 812.
- Pardilla-Delgado, E., & Payne, J. D. (2017). The impact of sleep on true and false memory across long delays. *Neurobiology of learning and memory*, 137, 123-133.
- Paulin, T., Roquet, D., Kenett, Y. N., Savage, G., & Irish, M. (2020). The effect of semantic memory degeneration on creative thinking : A voxel-based morphometry analysis. *NeuroImage*, 117073. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117073>
- Payne, J. D., Schacter, D. L., Propper, R. E., Huang, L.-W., Wamsley, E. J., Tucker, M. A., Walker, M. P., & Stickgold, R. (2009). The role of sleep in false memory formation. *Neurobiology of learning and memory*, 92(3), 327-334.
- Peigneux, P., Laureys, S., Delbeuck, X., & Maquet, P. (2001). Sleeping brain, learning brain. The role of sleep for memory systems. *Neuroreport*, 12(18), A111-A124.
- Peyrache, A., Battaglia, F. P., & Destexhe, A. (2011). Inhibition recruitment in prefrontal cortex during sleep spindles and gating of hippocampal inputs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(41), 17207-17212.
- Pidgeon, L. M., Grealy, M., Duffy, A. H., Hay, L., McTeague, C., Vuletic, T., Coyle, D., & Gilbert, S. J. (2016). Functional neuroimaging of visual creativity : A systematic review and meta-analysis. *Brain and behavior*, 6(10), e00540.
- Popov, V., Hristova, P., & Anders, R. (2017). The relational luring effect : Retrieval of relational information during associative recognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 146(5), 722.
- Power, J. D., & Petersen, S. E. (2013). Control-related systems in the human brain. *Current opinion in neurobiology*, 23(2), 223-228.

- Pranavathiyani, G., Thanmalagan, R. R., Leimarembi Devi, N., & Venkatesan, A. (2019). Integrated transcriptome interactome study of oncogenes and tumor suppressor genes in breast cancer. *Genes & Diseases*, 6(1), 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.gendis.2018.10.004>
- Raichle, M. E. (2015). The restless brain : How intrinsic activity organizes brain function. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1668). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0172>
- Ramnani, N., & Owen, A. M. (2004). Anterior prefrontal cortex : Insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature reviews neuroscience*, 5(3), 184-194.
- Rankin, K. P., Liu, A. A., Howard, S., Slama, H., Hou, C. E., Shuster, K., & Miller, B. L. (2007). A Case-controlled Study of Altered Visual Art Production in Alzheimer's and FTL. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 20(1), 48-61. <https://doi.org/10.1097/WNN.0b013e31803141dd>
- Rasch, B., & Born, J. (2007). Maintaining memories by reactivation. *Current opinion in neurobiology*, 17(6), 698-703.
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological reviews*.
- Rasch, B., Büchel, C., Gais, S., & Born, J. (2007). Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation. *Science*, 315(5817), 1426-1429.
- Rasmusson, D. (2000). The role of acetylcholine in cortical synaptic plasticity. *Behavioural brain research*, 115(2), 205-218.
- Raynal, L., Clément, E., & Sander, E. (2020). Are Superficially Dissimilar Analogs better retrieved than Superficially Similar Disanalogs? *Acta Psychologica*, 203, 102989.
- Razumnikova, O. M. (2007). Creativity related cortex activity in the remote associates task. *Brain Research Bulletin*, 73(1-3), 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.02.008>
- Reed, S. K., Ernst, G. W., & Banerji, R. (1974). The role of analogy in transfer between similar problem states. *Cognitive Psychology*, 6(3), 436-450. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(74\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90020-6)
- Reiter-Palmon, R., Forthmann, B., & Barbot, B. (2019). Scoring divergent thinking tests : A review and systematic framework. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 13(2), 144-152. <https://doi.org/10.1037/aca0000227>

- Reitman, W. R., Grove, R. B., & Shoup, R. G. (1964). Argus : An information-processing model of thinking. *Behavioral Science*, *9*(3), 270.
- Reverberi, C., Toraldo, A., D'Agostini, S., & Skrap, M. (2005). Better without (lateral) frontal cortex? Insight problems solved by frontal patients. *Brain*, *128*(12), 2882-2890. <https://doi.org/10.1093/brain/awh577>
- Richland, L. E., Morrison, R. G., & Holyoak, K. J. (2006). Children's development of analogical reasoning : Insights from scene analogy problems. *Journal of experimental child psychology*, *94*(3), 249-273.
- Rittenhouse, C. D., Stickgold, R., & Hobson, J. A. (1994). Constraint on the transformation of characters, objects, and settings in dream reports. *Consciousness and cognition*, *3*(1), 100-113.
- Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories : Remembering words not presented in lists. *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*(4), 803.
- Rosen, A., & Reiner, M. (2016). Right frontal gamma and beta band enhancement while solving a spatial puzzle with insight. *International Journal of Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.09.008>
- Rothmaler, K., Nigbur, R., & Ivanova, G. (2017). New insights into insight : Neurophysiological correlates of the difference between the intrinsic "aha" and the extrinsic "oh yes" moment. *Neuropsychologia*, *95*, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.12.017>
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity : Uses and interpretations. *NeuroImage*, *52*(3), 1059-1069. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003>
- Salvi, C., Bricolo, E., Franconeri, S. L., Kounios, J., & Beeman, M. (2015). Sudden insight is associated with shutting out visual inputs. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(6), 1814-1819. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0845-0>
- Salvi, C., Simoncini, C., Grafman, J., & Beeman, M. (2020). Oculometric signature of switch into awareness? Pupil size predicts sudden insight whereas microsaccades predict problem-solving via analysis. *NeuroImage*, *217*, 116933. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116933>
- Sander, E. (1997). *Analogie et catégorisation*.

- Sander, E. (2017). Les champs des connaissances naïves. *Psychologie du développement*, 217.
- Sander, E., & Richard, J.-F. (1998). Analogy making as a categorization and an abstraction process. *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational and neural sciences*, 381-389.
- Sander, E., & Richard, J.-F. (2005). *Analogy and transfer : Encoding the problem at the right level of abstraction*. 1925-1930.
- Sanders, K. E. G., Osburn, S., Paller, K. A., & Beeman, M. (2019). Targeted Memory Reactivation During Sleep Improves Next-Day Problem Solving. *Psychological Science*, 30(11), 1616-1624. <https://doi.org/10.1177/0956797619873344>
- Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2008). Deconstructing Insight : EEG Correlates of Insightful Problem Solving. *PLOS ONE*, 3(1), e1459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001459>
- Schilling, M. A. (2005). A « small-world » network model of cognitive insight. *Creativity Research Journal*, 17(2-3), 131-154.
- Schönauer, M., Brodt, S., Pöhlchen, D., Breßmer, A., Danek, A. H., & Gais, S. (2018). Sleep Does Not Promote Solving Classical Insight Problems and Magic Tricks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 72. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00072>
- Schouten, D. I., Pereira, S. I. R., Tops, M., & Louzada, F. M. (2017). State of the art on targeted memory reactivation : Sleep your way to enhanced cognition. *Sleep Medicine Reviews*, 32, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2016.04.002>
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L., & Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *Journal of Neuroscience*, 27(9), 2349-2356.
- Senf, P., Scheuren, L., & Holtkamp, M. (2016). Is there a creative functional paradoxical facilitation in juvenile myoclonic epilepsy? *Epilepsy & Behavior*, 62, 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.07.023>
- Shamay-Tsoory, S. G., Adler, N., Aharon-Peretz, J., Perry, D., & Mayseless, N. (2011). The origins of originality : The neural bases of creative thinking and originality. *Neuropsychologia*, 49(2), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.020>

- Shanahan, L. K., Gjorgieva, E., Paller, K. A., Kahnt, T., & Gottfried, J. A. (2018). Odor-evoked category reactivation in human ventromedial prefrontal cortex during sleep promotes memory consolidation. *Elife*, *7*, e39681.
- Shemyakina, N. V., Danko, S. G., Nagornova, Zh. V., Starchenko, M. G., & Bechtereva, N. P. (2007). Changes in the power and coherence spectra of the EEG rhythmic components during solution of a verbal creative task of overcoming a stereotype. *Human Physiology*, *33*(5), 524-530. <https://doi.org/10.1134/S0362119707050027>
- Shen, W., Tong, Y., Li, F., Yuan, Y., Hommel, B., Liu, C., & Luo, J. (2018). Tracking the neurodynamics of insight : A meta-analysis of neuroimaging studies. *Biological psychology*, *138*, 189-198.
- 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. *International Journal of Psychophysiology*, *110*, 81-90.
- Shen, X., Finn, E. S., Scheinost, D., Rosenberg, M. D., Chun, M. M., Papademetris, X., & Constable, R. T. (2017). Using connectome-based predictive modeling to predict individual behavior from brain connectivity. *nature protocols*, *12*(3), 506-518.
- Sheth, B. R., Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2009). Posterior Beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(7), 1269-1279. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21069>
- Shin, M., & Jeon, H.-A. (2021). A Cortical Surface-Based Meta-Analysis of Human Reasoning. *Cerebral Cortex*, *31*(12), 5497-5510. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab174>
- Siapas, A. G., & Wilson, M. A. (1998). Coordinated interactions between hippocampal ripples and cortical spindles during slow-wave sleep. *Neuron*, *21*(5), 1123-1128.
- Siegler, R. S. (2000). Unconscious insights. *Current Directions in Psychological Science*, *9*(3), 79-83.
- Siew, C. S., Wulff, D. U., Beckage, N. M., & Kenett, Y. N. (2019). Cognitive network science : A review of research on cognition through the lens of network representations, processes, and dynamics. *Complexity*, *2019*.
- Silliman, D. C., & Kurtz, K. J. (2019). Evidence of analogical re-representation from a change detection task. *Cognition*, *190*, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.04.031>

- Silver, E. A. (1981). Recall of mathematical problem information : Solving related problems. *Journal for research in mathematics education*, 12(1), 54-64.
- Silvia, P. J., Winterstein, B. P., Willse, J. T., Barona, C. M., Cram, J. T., Hess, K. I., Martinez, J. L., & Richard, C. A. (2008). Assessing creativity with divergent thinking tasks : Exploring the reliability and validity of new subjective scoring methods. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 2(2), 68-85. <https://doi.org/10.1037/1931-3896.2.2.68>
- Sio, U. N., Monaghan, P., & Ormerod, T. (2013). Sleep on it, but only if it is difficult : Effects of sleep on problem solving. *Memory & Cognition*, 41(2), 159-166. <https://doi.org/10.3758/s13421-012-0256-7>
- Sirota, A., Csicsvari, J., Buhl, D., & Buzsáki, G. (2003). Communication between neocortex and hippocampus during sleep in rodents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(4), 2065-2069.
- Smith, M. R., Antrobus, J. S., Gordon, E., Tucker, M. A., Hirota, Y., Wamsley, E. J., Ross, L., Doan, T., Chaklader, A., & Emery, R. N. (2004). Motivation and affect in REM sleep and the mentation reporting process. *Consciousness and Cognition*, 13(3), 501-511.
- Solé, R. V., Corominas-Murtra, B., Valverde, S., & Steels, L. (2010). Language networks : Their structure, function, and evolution. *Complexity*, 15(6), 20-26.
- Sporns, O. (2011). The human connectome : A complex network: The human connectome. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 109-125. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05888.x>
- Sporns, O. (2018). Graph theory methods : Applications in brain networks. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 20(2), 111-121. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2018.20.2/osporns>
- Sprugnoli, G., Rossi, S., Emmendorfer, A., Rossi, A., Liew, S.-L., Tatti, E., di Lorenzo, G., Pascual-Leone, A., & Santarnecchi, E. (2017). Neural correlates of Eureka moment. *Intelligence*, 62, 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.004>
- Sridharan, D., Levitin, D. J., & Menon, V. (2008). A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(34), 12569-12574.
- Sternberg, R. J. (1999). *Handbook of creativity*. Cambridge University Press.
- Steyvers, M., & Tenenbaum, J. B. (2005). The large-scale structure of semantic networks : Statistical analyses and a model of semantic growth. *Cognitive science*, 29(1), 41-78.

- Stickgold, R., Hobson, J. A., Fosse, R., & Fosse, M. (2001). Sleep, learning, and dreams : Off-line memory reprocessing. *Science*, *294*(5544), 1052-1057.
- Stickgold, R., Scott, L., Rittenhouse, C., & Hobson, J. A. (1999). Sleep-Induced Changes in Associative Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(2), 182-193. <https://doi.org/10.1162/089892999563319>
- Strang, A., Haynes, O., Cahill, N. D., & Narayan, D. A. (2018). Generalized relationships between characteristic path length, efficiency, clustering coefficients, and density. *Social Network Analysis and Mining*, *8*(1), 1-6.
- Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011). Brainstorm : A user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Computational intelligence and neuroscience*, *2011*.
- Teige, C., Cornelissen, P. L., Mollo, G., Gonzalez Alam, T. R. del J., McCarty, K., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2019). Dissociations in semantic cognition : Oscillatory evidence for opposing effects of semantic control and type of semantic relation in anterior and posterior temporal cortex. *Cortex*, *120*, 308-325. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.07.002>
- Thiebaut de Schotten, M., Urbanski, M., Batrancourt, B., Levy, R., Dubois, B., Cerliani, L., & Volle, E. (2017). Rostro-caudal Architecture of the Frontal Lobes in Humans. *Cerebral Cortex*, *27*(8), 4033-4047. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw215>
- Thurstone, L. L., & Thurstone, T. G. (1941). Factorial studies of intelligence. *Psychometric monographs*.
- Tinguely, G., Huber, R., Borbély, A. A., & Achermann, P. (2006). Non-rapid eye movement sleep with low muscle tone as a marker of rapid eye movement sleep regulation. *BMC Neuroscience*, *7*(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-7-2>
- Tononi, G., & Cirelli, C. (2006). Sleep function and synaptic homeostasis. *Sleep medicine reviews*, *10*(1), 49-62.
- Tononi, G., & Cirelli, C. (2014). Sleep and the price of plasticity : From synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. *Neuron*, *81*(1), 12-34.
- Topolinski, S., & Reber, R. (2010). Gaining Insight Into the “Aha” Experience. *Current Directions in Psychological Science*, *19*(6), 402-405. <https://doi.org/10.1177/0963721410388803>

- Torrance, E. P. (1972). Predictive Validity of the Torrance Tests of Creative Thinking*. *The Journal of Creative Behavior*, 6(4), 236-262. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1972.tb00936.x>
- Urbanski, M., Bréchemier, M.-L., Garcin, B., Bendetowicz, D., Thiebaut de Schotten, M., Foulon, C., Rosso, C., Clarençon, F., Dupont, S., Pradat-Diehl, P., Labeyrie, M.-A., Levy, R., & Volle, E. (2016). Reasoning by analogy requires the left frontal pole : Lesion-deficit mapping and clinical implications. *Brain*, 139(6), 1783-1799. <https://doi.org/10.1093/brain/aww072>
- Vallat, R., Meunier, D., Nicolas, A., & Ruby, P. (2019). Hard to wake up ? The cerebral correlates of sleep inertia assessed using combined behavioral, EEG and fMRI measures. *NeuroImage*, 184, 266-278.
- Vallat, R., Türker, B., Nicolas, A., & Ruby, P. (2022). High Dream Recall Frequency is Associated with Increased Creativity and Default Mode Network Connectivity. *Nature and Science of Sleep*, Volume 14, 265-275. <https://doi.org/10.2147/NSS.S342137>
- Vartanian, O. (2012). Dissociable neural systems for analogy and metaphor : Implications for the neuroscience of creativity. *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, 103(3), 302-316. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.2011.02073.x>
- 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. *Human brain mapping*, 39(7), 2987-2996.
- Vatanever, D., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2021). Varying demands for cognitive control reveals shared neural processes supporting semantic and episodic memory retrieval. *Nature communications*, 12(1), 1-11.
- Vertes, R. P., & Siegel, J. M. (2005). Time for the sleep community to take a critical look at the purported role of sleep in memory processing. *Sleep*, 28(10), 1228-1229.
- Vilette, B., Fischer, J.-P., Sander, E., Sensevy, G., Quilio, S., & Richard, J.-F. (2017). Peut-on améliorer l'enseignement et l'apprentissage de l'arithmétique au CP? Le dispositif ACE. *Revue française de pédagogie*, 4, 105-120.
- Volle, E. (2017). Associative and controlled cognition in divergent thinking : Theoretical, experimental, neuroimaging evidence, and new directions. In *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity* (Cambridge University Press). Editors: R.E. Jung and O. Vartanian.

- Volle, E., Gilbert, S. J., Benoit, R. G., & Burgess, P. W. (2010). Specialization of the rostral prefrontal cortex for distinct analogy processes. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *20*(11), 2647-2659. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq012>
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, *427*(6972), 352-355.
- Walker, M. P., Liston, C., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2002). Cognitive flexibility across the sleep-wake cycle : REM-sleep enhancement of anagram problem solving. *Cognitive Brain Research*, *14*(3), 317-324.
- Wamsley, E. J., & Stickgold, R. (2010). Dreaming and offline memory processing. *Current Biology*, *20*(23), R1010-R1013.
- Wamsley, E. J., Tucker, M., Payne, J. D., Benavides, J. A., & Stickgold, R. (2010). Dreaming of a learning task is associated with enhanced sleep-dependent memory consolidation. *Current Biology*, *20*(9), 850-855.
- Warren, D. E., Kurczek, J., & Duff, M. C. (2016). What relates newspaper, definite, and clothing? An article describing deficits in convergent problem solving and creativity following hippocampal damage: Hippocampal Damage Impairs Convergent Problem Solving. *Hippocampus*, *26*(7), 835-840. <https://doi.org/10.1002/hipo.22591>
- Weinberger, A. B., Gallagher, N. M., Colaizzi, G., Liu, N., Parrott, N., Fearon, E., Shaikh, N., & Green, A. E. (2022). Analogical mapping across sensory modalities and evidence for a general analogy factor. *Cognition*, *223*, 105029.
- Weinberger, A. B., Green, A. E., & Chrysikou, E. G. (2017). Using Transcranial Direct Current Stimulation to Enhance Creative Cognition : Interactions between Task, Polarity, and Stimulation Site. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00246>
- Weinberger, A. B., Iyer, H., & Green, A. E. (2016). Conscious Augmentation of Creative State Enhances “Real” Creativity in Open-Ended Analogical Reasoning. *PLOS ONE*, *11*(3), e0150773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150773>
- Weisberg, R. W. (2006). *Creativity : Understanding innovation in problem solving, science, invention, and the arts*. John Wiley & Sons.
- Weisberg, R. W. (2013). On the “Demystification” of Insight : A Critique of Neuroimaging Studies of Insight. *Creativity Research Journal*, *25*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/10400419.2013.752178>

- Wharton, C. M., Holyoak, K. J., Downing, P. E., Lange, T. E., Wickens, T. D., & Melz, E. R. (1994). Below the Surface : Analogical Similarity and Retrieval Competition in Reminding. *Cognitive Psychology*, *26*(1), 64-101. <https://doi.org/10.1006/cogp.1994.1003>
- Wharton, C. M., Holyoak, K. J., & Lange, T. E. (1996). Remote analogical reminding. *Memory & Cognition*, *24*(5), 629-643.
- Whitehurst, L. N., Cellini, N., McDevitt, E. A., Duggan, K. A., & Mednick, S. C. (2016). Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(26), 7272-7277.
- Whitney, C., Jefferies, E., & Kircher, T. (2011). Heterogeneity of the left temporal lobe in semantic representation and control : Priming multiple versus single meanings of ambiguous words. *Cerebral cortex*, *21*(4), 831-844.
- Wilhelm, I., Rose, M., Imhof, K. I., Rasch, B., Büchel, C., & Born, J. (2013). The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature neuroscience*, *16*(4), 391-393.
- Wilson, M. A., & McNaughton, B. L. (1994). Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, *265*(5172), 676-679.
- Windt, J. M. (2013). Reporting dream experience : Why (not) to be skeptical about dream reports. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00708>
- Wu, C.-L., Huang, S.-Y., Chen, P.-Z., & Chen, H.-C. (2020). A systematic review of creativity-related studies applying the remote associates test from 2000 to 2019. *Frontiers in psychology*, *11*, 573432.
- Wu, X., Yang, W., Tong, D., Sun, J., Chen, Q., Wei, D., Zhang, Q., Zhang, M., & Qiu, J. (2015). A meta-analysis of neuroimaging studies on divergent thinking using activation likelihood estimation. *Human Brain Mapping*, *36*(7), 2703-2718. <https://doi.org/10.1002/hbm.22801>
- Yan, T., Zhuang, K., He, L., Liu, C., Zeng, R., & Qiu, J. (2021). Left temporal pole contributes to creative thinking via an individual semantic network. *Psychophysiology*, *58*(8), e13841.
- Yang, W., Green, A. E., Chen, Q., Kenett, Y. N., Sun, J., Wei, D., & Qiu, J. (2022). Creative problem solving in knowledge-rich contexts. *Trends in Cognitive Sciences*, *S1364661322001565*. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.012>

- Yee, E., & Thompson-Schill, S. L. (2016). Putting concepts into context. *Psychonomic bulletin & review*, 23(4), 1015-1027.
- Yeo, B. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., & Polimeni, J. R. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of neurophysiology*.
- Yeo, B. T. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., Polimeni, J. R., Fischl, B., Liu, H., & Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 106(3), 1125-1165. <https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>
- Yordanova, J., Kolev, V., Verleger, R., Bataghva, Z., Born, J., & Wagner, U. (2008). Shifting from implicit to explicit knowledge : Different roles of early-and late-night sleep. *Learning & Memory*, 15(7), 508-515.
- Yu, Y., Beaty, R., Forthmann, B., Beeman, M., Cruz, J. H., & Johnson, D. R. (2022). *A mad method to assess idea novelty : Improving validity of automatic scoring using maximum associative distance (MAD)*.
- Zadra, A. L., Nielsen, T. A., & Donderi, D. C. (1998). Prevalence of auditory, olfactory, and gustatory experiences in home dreams. *Perceptual and motor skills*, 87(3), 819-826.
- Zamani, M., & Richard, J.-F. (2000). Object encoding, goal similarity, and analogical transfer. *Memory & Cognition*, 28(5), 873-886.
- Zander, T., Volz, K. G., Born, J., & Diekelmann, S. (2017). Sleep increases explicit solutions and reduces intuitive judgments of semantic coherence. *Learning & Memory*, 24(12), 641-645.
- Zemla, J. C., & Austerweil, J. L. (2018). Estimating semantic networks of groups and individuals from fluency data. *Computational brain & behavior*, 1(1), 36-58.
- Zhou, S., Chen, S., Wang, S., Zhao, Q., Zhou, Z., & Lu, C. (2018). Temporal and spatial patterns of neural activity associated with information selection in open-ended creativity. *Neuroscience*, 371, 268-276.

Annexes

- A. Modification des comportements créatifs pendant le confinement et la pandémie de la COVID-19**

- B. Pourquoi et comment étudier la créativité dans une population de patients en neurochirurgie ?**



Through Thick and Thin: Changes in Creativity During the First Lockdown of the COVID-19 Pandemic

Alizée Lopez-Persem^{1*}, Théophile Bieth^{1,2†}, Stella Guiet¹, Marcela Ovando-Tellez¹ and Emmanuelle Volle^{1*}

¹ FrontLab, Sorbonne Université, Institut du Cerveau - Paris Brain Institute - ICM, INSERM, CNRS, AP-HP, Hôpital de la Pitié Salpêtrière, Paris, France, ² Neurology Department, AP-HP, Hôpital de la Pitié Salpêtrière, Paris, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Andrea Schiavio,
University of Graz, Austria

Reviewed by:

Daniela Popa,
Transilvania University of Braşov,
Romania
Adam Weinberger,
Georgetown University, United States
Adrian Kempf,
University of Graz, Austria

*Correspondence:

Alizée Lopez-Persem
lopez.alizee@gmail.com
Emmanuelle Volle
emmanvolle@gmail.com

† These authors have contributed
equally to this work

Specialty section:

This article was submitted to
Performance Science,
a section of the journal
Frontiers in Psychology

Received: 15 December 2021

Accepted: 29 March 2022

Published: 10 May 2022

Citation:

Lopez-Persem A, Bieth T, Guiet S,
Ovando-Tellez M and Volle E (2022)
Through Thick and Thin: Changes
in Creativity During the First
Lockdown of the COVID-19
Pandemic.
Front. Psychol. 13:821550.
doi: 10.3389/fpsyg.2022.821550

COVID-19 took us by surprise. We all had to face the lockdown and pandemic that put us in a new context, changing our way of life, work conditions, and habits. Coping with such an unprecedented situation may have stimulated creativity. However, the situation also restricted our liberties and triggered health or psychological difficulties. We carried out an online survey ($n = 380$) to examine whether and how the COVID-19 related first lockdown period was associated with creativity changes in French speaking population. Despite a global negative subjective experience of the situation, participants reported that they were more creative during the lockdown than before. Positive changes were linked with more time availability, more motivation, or the need to solve a problem while negative changes were related to negative affective feelings or a lack of resources or opportunities. This study documents the effects of the first lockdown period on creativity and the factors that influenced it.

Keywords: creativity, COVID-19, survey, lockdown, creative activities

INTRODUCTION

The context of the COVID-19 pandemic has led to the implementation of unprecedented restrictive measures in society. During spring 2020, 67 million French people entered the first strict lockdown, which dramatically changed our daily lives and wellbeing. These constraints implied a restriction of movement, the need to adapt working methods, a modification of daily life within households, and a decreased wellbeing (linked to health issues, restrictions of activities and social interactions, or economic consequences). Paradoxically, during this period, general and social media have reported that individuals and businesses seemed to show great adaptability to face the situation by finding innovative solutions and creative behaviors.

Creativity is defined in science as the ability to produce something that is both original and appropriate (Lubart et al., 2013). Creative abilities are involved in many human activities, from solving everyday problems to the great discoveries of our civilization. Creativity is a key mental capacity to cope with change, invent and innovate, and face the challenges of our society. The situation related to the COVID-19 and its consequences on our daily life are at the forefront of the current challenges we had and still have to cope with. Understanding the conditions that foster (or hinder) our creativity is essential, and the COVID-19 situation provides a unique opportunity to study some of these factors.

According to the multidimensional approach to creativity (Lubart et al., 2015), creativity and creative behaviors rely on cognitive factors (our mental capacities) and individual personality. It is influenced by internal and external factors (Lubart et al., 2013) including our emotions, motivation, and environment. Intrinsic motivation is an essential component of creative behavior (Amabile, 1983, 2018; Amabile and Pillemer, 2012; Mastria et al., 2018; Benedek et al., 2019; Fischer et al., 2019) and drives involvement, intensity, and perseverance in activities. Affective states influence creativity, as it has been demonstrated by several studies which have shown that creative thinking tasks are mood-sensitive (Davis, 2009). Positive mood (such as joy) is often reported as facilitating creativity, and negative mood (such as stress, anxiety) as hindering creativity. However, whether positive or negative moods facilitate or inhibit creativity is still debated and may depend on contextual factors (Baas et al., 2008; De Dreu et al., 2008; Davis, 2009). Finally, creative activities and achievements are influenced by our environment, at home or in the workspace (living conditions, cultural, and professional contexts), our social context (Amabile and Pillemer, 2012; Benedek et al., 2019), and by the standards, needs, and values of the society (Lubart et al., 2015).

The situation related to COVID-19 likely had a major impact on many if not all the creativity dimensions or factors described above, by affecting our emotions, motivations, and wellbeing (Bu et al., 2020; Li et al., 2020; Michinov and Michinov, 2020; Roma et al., 2020; Zabelina et al., 2021), modifying our environment, our lifestyle, and availability, but also the standards and incentives of our society during this period, opening a new framework of thought (Kapoor and Kaufman, 2020; Beghetto, 2021). The few existing scientific studies that explored creativity during the COVID-19 pandemic have indeed suggested that the lockdown period facilitated everyday creativity (Karwowski et al., 2021; Mercier et al., 2021) or that creative abilities could help people dealing with the situation and improve their wellbeing (Michinov and Michinov, 2020; Tang et al., 2020; Elisondo, 2021; Hofreiter et al., 2021; Orkibi, 2021). However, those studies did not assess qualitative and quantitative aspects of how creativity changes related to environmental, contextual, or emotional changes.

The current study aimed at exploring how the lockdown and context related to COVID-19 impacted creativity and identifying the potential factors linked to these changes. We assumed that the lockdown could have stimulated creativity for at least two reasons. First, the lockdown increased the availability of free time by reducing our usual daily outdoor activities and, in some cases, workload. Second, the new situation created a need or drive, pushing the individuals to adapt and invent new solutions to pursue their usual activities. However, the situation may have caused negative subjective experience and distress, with stress and anxiety, a feeling of pressure, a lower mood, which can alter creativity. Last, because the restrictive measures targeted social interactions, we hypothesized that social distancing could also have harmed creativity. We carried out an online survey to estimate the impact of these potential factors on self-perceived

creativity changes and changes in concrete creative activities and achievements.

MATERIALS AND METHODS

Ethics and Participants

The study was approved by an ethical committee. All the data were collected anonymously online and in compliance with the General Data Protection Regulation (GDPR). The participants were recruited online through social networks. Respondents were invited to complete the entire survey if they were French speakers over 18 years old, agreed to participate, and did not already participate.

In total, we collected data from 551 participants (365 females and 186 males; mean age 42.31 years, age ranging from 18 to 84 years). Participants were French speakers and completed the survey between May 27th and August 1st of the year 2020. All questions referred to the lockdown period, that was, in mainland France, from March 16th to May 11th of the year 2020. Data from 171 participants were removed because they did not complete more than 50% of the survey. The final sample of the survey considered the data collected from 380 participants (281 females and 99 males; mean age 43.16 years, age ranging from 18 to 84 years). All demographic details about included participants are provided in **Supplementary Method 1, Table 1**, and **Supplementary Table 1**.

Survey and Scores

The survey was programmed in Qualtrics as a self-administered questionnaire. We collected four main categories of information including demographic data, several creativity measures, physical conditions and affective experience of the lockdown with independent questions (see **Supplementary Method 1**). The collected information is detailed below and the content of the survey is further detailed in **Supplementary Tables 1–4**.

Demographic Data and Lockdown Situation and Residency

We collected individual basic demographic information including age, gender, education level, socio-professional activity, and main field of activity. We also collected more specific information relative to the lockdown residency (residential area type, own residence, country of residence, access to private or large public outdoor spaces), whether professional activity was COVID-19 related, professional situation, and the occurrence of a serious problem that could have limited the initiation of activities (and in this case, how long it limited one's activities) (**Supplementary Table 1**). To ensure that our results were not impacted by participants living outside of France (with potential different lockdown dates and restrictions), we re-ran our main analyses with participants who indicated living in France ($n = 293$) and found that all results remained qualitatively unchanged.

TABLE 1 | Demographic data.

Participants	Total included	SCC Mean	SCC SEM
	380	8.0	0.98
Gender [$F(1, 378) = 0.01, p = 0.93$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
Female	281	73.95	8.12 1.17
Male	99	26.05	7.94 1.78
Education [$\rho(378) = 0.04, p = 0.44$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
No High School Diploma	13	3.42	0.15 5.91
High School Diploma or Secondary Education Certificate (Baccalaureat in French)	32	8.42	9.56 3.64
2 or 3 years completed after High School Diploma (e.g., Bachelor's degree)	73	19.21	7.78 2.17
4 or 5 years completed after High School Diploma (e.g., Master's degree)	154	40.53	7.6 1.61
More than 6 years completed after High School Diploma (e.g., Doctorate's degree)	108	28.42	9.46 1.66
Age (mean = 43.16, SE = 15.85) [$r(378) = -0.02, p = 0.69$, (continuous measure)]	N	%	SCC Mean SCC SEM
18–21	8	2.11	5.75 6.08
21–30	97	25.53	9.98 1.89
31–40	79	20.79	6.94 2.22
41–50	66	17.37	4.73 2.25
51–60	76	20.00	11.42 1.98
61–70	30	7.89	7.63 4.31
71 +	20	5.26	3.7 4.62
Residential area [$F(2, 377) = 0.43, p = 0.65$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
Urban	191	50.26	8.4 1.27
Peri	128	33.68	6.92 1.85
Rural	61	16.05	9.49 2.51
Residence during lockdown [$F(1, 378) = 0, p = 0.99$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
My home	322	84.74	8.07 01.05
Other	58	15.26	8.1 2.64
Country [$F(5, 317) = 0.25, p = 0.94$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
France	293	77.11	7.9 1.12
France-outré mer	2	0.53	8.5 8.5
Suisse	2	0.53	18 2
Canada	2	0.53	2 8
Belgique	6	1.58	8.67 4.2
Other	18	4.74	9.67 4.9
Professional activity [$F(1, 378) = 0, p = 0.99$]	N	%	SCC Mean SCC SEM
Related to the fight against COVID-19	43	11.32	7.86 3.15
Unrelated to the fight against COVID-19	315	82.89	7.87 1.06

Each information is displayed with statistical tests (one-factor ANOVA for categorical factors, Spearman correlation coefficients for ordinal factors, Pearson correlation coefficients for continuous factors) on SCC. SCC mean and SEM are reported in the table. N indicates the number of participants in each category.

Measures of Creativity

We assessed creativity using four different approaches related to participants' creativity.

Subjective Creativity Change

The main measure was the *subjective creativity change (SCC)* that aims to capture the self-perceived creativity change during the lockdown period. We asked participants how much they think their creativity changed positively or negatively during the lockdown as compared to before. The participants responded using a continuous visual scale ranging from -50 (less creative during the lockdown) to 50 (more creative during the lockdown). Hence, SCC relies on a self-rating of one's own creativity. Similar self-report scales or ratings measuring creativity belief, self-concept, and self-efficacy have been developed (Beghetto, 2006; Ng and Feldman, 2012; Karwowski and Barbot, 2016; Karwowski and Lebeda, 2016, 2017; Karwowski et al., 2019) and used in COVID-19-related studies (Hofreiter et al., 2021; Mercier et al., 2021; Patston et al., 2021). In contrast to these previous measures, we asked participants to rate a change in their creativity related to a key event (i.e., the beginning of the lockdown). This allowed us to minimize recall bias and avoid the need of baseline measure that was difficult to obtain. To check our approach's validity, we compared this new creativity measure to more standard ones, including openness personality traits and several activity-based measures described below.

Openness Personality Traits

We adapted a French-translated version of the *Openness part of the Big Five Inventory (BFI-O)* (Plaisant et al., 2010). This is an 11 questions questionnaire that evaluates the openness personality traits of participants. We chose the BFI-O because openness is the personality trait most associated with creativity (Beatty et al., 2017; Vartanian et al., 2018). The participants answered each of the 11 questions using a 5-point Likert scale, converted to individual scores ranging from -2 to 2 . The BFI-O score was computed as the mean of the 11 individual responses recorded in the BFI-O.

Changes in Creative Activities and Achievements, and Reasons for Changes

In addition, we collected information about lockdown-related changes concerning participants' involvement in creative activities in an independent part of the survey. We aimed to qualitatively and quantitatively assess the creativity changes induced by the lockdown on a list of 28 creative activities (see **Supplementary Table 2**). The 28 activities were selected based on existing items in other validated creativity questionnaires, including Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA) (Diedrich et al., 2017), Creative Behavior Inventory (CBI) (Hocevar, 1979), and Runco Ideational Behavioral Scale (RIBS) (Runco et al., 2014). For each activity, participants had to answer sequential questions about their involvement in this activity. The sequence of questions was conditional to their previous responses as the survey progressed (see **Supplementary Figure 1** for a summary). The sequence was repeated for each of the 28 activities as follows.

For each activity, participants were first asked whether they had performed the activity during the last 5 years (lockdown period included). If not, the sequence stopped, and they were asked about the next activity. If so, they were asked whether they did it during the lockdown period and at which frequency (“much less,” “less,” “as much,” “more,” or “much more” than before the lockdown period). They could also indicate whether they did it only during the lockdown period, i.e., if the activity was new for them. The responses were converted into a ranking value from -2 (“much less”) to 2 (“much more”) providing an **activity frequency change score**. In case the activity was not performed during the lockdown period, we assigned the value of -3 . The frequency change score was computed for each participant as the mean of these ranking values across activities. We also computed the proportion of activities for each participant for which there was a negative, a positive, or no change.

In the next step, we aimed to understand the reasons for the changes. For each activity that was reported either less or more performed during the lockdown period than before, multiple-choice questions were displayed with several potential reasons for the change and the participants selected the ones that applied to them (different options were proposed for negative and positive changes, see **Supplementary Table 3**). Participants also had the option to write down their answers if none of the options were satisfying. We manually reviewed the responses they provided, and based on the frequency of some of them, we created two new *a posteriori* categories of motives for positive changes (see **Supplementary Table 3**). For each participant, and separately for positive and negative changes, we computed the number of times each reason was selected divided by the total number of activities for which changes were reported. This allowed us to quantify the main reasons leading to positive and negative changes in creative activities.

Finally, for activities performed as much or more often during the lockdown period than before, we asked: (1) How participants valorized it: Participants were asked to make a multiple choice among 11 options to assess the level of achievement of the performed activity (see **Supplementary Table 3**). Using a procedure similar to the ICAA scoring, each option was converted to a numerical value and the values corresponding to all the selected options for a given activity were summed. If participants shared their creative activities at least beyond the immediate surroundings (friends, family, cohabitant, or colleague), they automatically reached 8 points, and the three first proposals were not considered in the sum. Then, participant’s scores were averaged across activities for each participant to compute an individual **creative achievement score**. (2) To report their feeling of having encountered obstacles during its realization using a visual quasi-continuous scale of 101 values from 0 (no obstacles) to 100 (many obstacles). The **obstacle score** was computed as the mean of obstacles rating across activities for each participant.

When the series of questions related to one activity (and dependent on participant’s responses) was complete, the same

sequence was proposed for the next activity until the end of the list of 28 activities.

Creativity Rating

Finally, at the end of the survey, we asked participants to freely report the five most creative realizations (or top-productions) they carried out during the lockdown. They entered their responses directly in a text box without any time or word limit and with the possibility to leave empty boxes. An external panel of four experts independently rated the creativity of each of the top-productions using a 5-point Likert scale from 0 (“not creative”) to 5 (“highly creative”). The number of four raters have been previously suggested as sufficient to reach high inter-rater reliability when raters are experts (interrater reliability higher than 0.6) (Ceh et al., 2021). We estimated the interrater reliability by computing two-way random intra class correlations (ICC). A satisfying reliability was observed between judges. The average measure ICC was 0.95 [$F(286, 858) = 19.84, p < 0.001, 95\% \text{ CI } (0.94, 0.96)$]. Then, the ratings were averaged across judges for each top-production, and we computed for each participant a **creativity rating score** as the sum of averaged ratings of his/her productions. The **creativity rating score** aims to reflect the creativity of the activities achieved during the lockdown. Hence, it may both depend on the pre-existing creativity of the participants and on the effect of the lockdown situation on their creative thinking and behavior.

Psychological and Physical Conditions of Lockdown

In the survey, we asked specific questions about how participants experienced the lockdown. The aim was to identify subjective and objective factors that can explain creativity changes based on our hypotheses. We collected four categories of information.

Environmental Conditions

We asked the participants to report the number of cohabitants and the number of available rooms in the residence place, allowing us to compute the objective available **space per cohabitant** (i.e., the number of rooms per inhabitant). We also collected the subjective feeling of change in **physical constraints**.

Social Relationships

Participants were asked whether they exchanged with as many people during the lockdown period as before to estimate changes in **social interactions** and the feeling of a change in **loneliness**. These variables aim to reflect changes in social relationships during the lockdown period.

Available Time

Participants were asked to report the objective **number of working hours** per week (multiple-choice question with eight options ranging from “not concerned” to “more than 42 h” with an increment of 7 h per option) and the feeling of a change in **free time**.

Affective Changes

Affective changes were assessed by asking participants their feeling of a change in **mood, motivation, anxiety and stress, and pressure** using separate questions.

All the questions focused on a change refer to a difference between the period before and during the lockdown. All subjective information was collected using multiple-choice questions with eight available choices: seven ranging from “much less” to “much more” and one allowing a neutral response (“I do not know”). Change in *free time* and in *social interactions* had only five available choices ranging from “much less” to “much more.” Those variables were considered as continuous (visual scales) or ordinal (Likert scales), and the sign was reversed for the ones with a negative meaning (indicated with “R” in figures and tables, such as *loneliness*) in order to obtain homogeneous valence across them (the higher, the better).

Statistical Analyses

We provide a demographical description of our sample using percentage relative to the total number of participants for each demographical variable. To explore how the participants experienced the lockdown, we tested the difference from zero for significance at the group level using one-sample two-tailed *t*-tests, where independent variables were the subjective feeling of change in environmental conditions, social relationships, available time, and affects (see above).

We explored whether the lockdown impacted the subjective creative change (measured as SCC) using a one-sample two-tailed *t*-test against zero at the group level. To estimate the impact of the four hypothesized factors (environmental conditions, social relationships, time availability, affective experience) on SCC, we first conducted a principal component analysis (PCA). It reduced the ten variables used (i.e., *space per cohabitant*, *physical constraints*, *social interactions*, *loneliness*, *number of working hours*, *free time*, *mood*, *motivation*, *anxiety and stress*, and *pressure*) into a smaller set of dimensions while retaining as much of the original information as possible. It also helped to deal with the problem of multicollinearity among our variables. We ran the PCA on our ten variables of interest with oblique rotation (direct oblimin) to rotate loadings and identify the variables contributing the most to each component, using the available complete data from 293 participants. Factors with eigenvalues over Kaiser’s criterion of 1 were kept. Sampling adequacy for the analysis was assessed with the Kaiser–Meyer–Olkin measure (standard threshold = 0.5). To identify potential links between factors and change in creativity, correlation analyses were performed using Pearson coefficient between SCC score and the component loadings across subjects.

Additionally, we checked whether demographical information influenced SCC. For binomial and categorical variables, one-way analyses of variance (ANOVAs) were used to test their effect on SCC. Correlation analyses were performed using Pearson coefficient (*r*) for continuous variables (such as age) and Spearman coefficient (*rho*) for ordinal variables (such as education).

We also explored whether the relationship between *creativity rating score* and SCC could be hypothetically mediated by creative personality traits (*BFI-O*) or by factors that were found to influence creativity. We ran mediation analyses. We tested whether the direct path from *creativity rating score* to SCC was no longer significant when introducing the mediator *M* (β^*_{SCC-RS} ,

M being either the *BFI-O* or the significant factor). Thus, the mediation analysis was estimated using the two following linear models:

$$SCC = \beta_{SCC-creativity\ rating\ score} \times creativity\ rating\ score$$

$$SCC = \beta^*_{SCC-creativity\ rating\ score} \times creativity\ rating\ score + \beta_{SCC-M} \times M$$

Path significance ($\beta_{SCC-creativity\ rating\ score} - \beta^*_{SCC-creativity\ rating\ score}$) was then assessed with a bootstrap test. We reported the 95 percent bootstrap confidence interval of the difference in regression coefficients between the direct and indirect path computed for 5,000 bootstraps. The mediation remains significant if this confidence interval does not include 0.

The same method was applied to investigate the relationship between *BFI-O*, SCC and Component 1.

With activity-based measures, our measures of interests were: (1) the five activities with the larger increase and decrease in frequency during the lockdown; (2) the categories of reasons explaining positive or negative changes in creative engagement; (3) the feeling of having encountered obstacles during its realization (*obstacle score*); (4) the way participants valorized their creative productions (*creative achievement score*).

We checked for consistency between all variables of interest. First, we explored the consistency of subjective creativity measure (SCC) with other measures of creativity using Pearson coefficient correlations (*r*) for continuous variables (*BFI-O* and *creativity rating score*) or with Spearman coefficient correlation (*rho*) for ordinal variables (*activity frequency change score*, *creative achievement score*, *obstacle score*). As we hypothesized that the amount of encountered obstacles could positively or negatively impact creativity, we also conducted a second order polynomial regression between SCC and *obstacle score*, as stated below:

$$O = \beta_0 + \beta_{lin}SCC + \beta_{quadr}SCC^2$$

A significant quadratic term indicates that obstacles affect creativity both positively and negatively (fewer obstacles would have a lower effect).

Second, we explored the consistency between reasons explaining changes in engaging in specific activities and the general subjective experience of the lockdown. We ran correlation analyses between the proportions of the main activity-based selected reasons (that were related to free time and affective states) and the components of our previous PCA that related to changes in SCC. For activity-related reasons, we computed the difference in the percentage of positive and negative reasons as follows: Free time-related reasons were the difference between the proportion of “More Time” and of “No time.” Affective change-related reasons were the difference in proportion between “Inspired” and both “Concerned and worries”/“Did not feel like it.” The difference between positive and negative reasons was computed as they might capture the same effect. For example, if

an individual selects “More time” as often as “No time” across activities (scores around zero), it might reflect a small change in experienced free time.

Third, we explore the consistency between within-factor measures of general subjective experiences of the lockdown. When relevant, we used Spearman (r) or Pearson (ρ) coefficient correlation between factors that captured similar information (such as between *physical constraints* and *space per cohabitant*).

Finally, to check the validity of the list of activities used in the activity-based measures, we examined whether each of the top-productions corresponded to an activity included in our list. We provided the mean creative rating score for those not included in our list and specified what type of activity it was. We also checked if the most frequent productions were in line with the five activities with the highest increase in frequency in the activity-based measures.

All analyses were performed using Matlab Statistical Toolbox (Matlab R2020a, The MathWorks, Inc., United States), SPSS (v22.0; IBM Corp.), and R (v3.6.2).

RESULTS

Demographics and Lockdown Situation

Overall, the majority of participants ($n = 380$) were confined in France (77%, and about 13% did not respond to that question), at home (85%), in urban areas (50%). 63% had access to private or large public outdoor spaces, 60% were confined with one or more individuals, and 87% declared not having encountered a severe problem during the lockdown. 54% were working remotely, and 83% had a professional activity not related to the fight against the pandemic. All demographic details are provided in **Table 1** and **Supplementary Table 1**.

Living Conditions and Subjective Experience of the Lockdown Situation

In the survey, participants were asked subjective and objective questions to gather information about their lockdown experience. As expected, on average and in terms of subjective experience, our sample felt more physically constrained [*physical constraints*: $M = 0.33 \pm 0.08$ (SEM, Standard Error of the Mean), $t(379) = 4.16, p < 0.001$], more lonely [*loneliness*: $M = 0.32 \pm 0.07$ (SEM), $t(379) = 4.69, p < 0.001$], and with more free time [*free time*: $M = 0.6 \pm 0.07$ (SEM), $t(379) = 8.82, p < 0.001$]. In terms of affective changes, they felt more anxious or stressed [*anxiety and stress*: $M = 0.32 \pm 0.08$ (SEM), $t(379) = 3.96, p < 0.001$], and had a poorer mood [*mood*: $M = -0.18 \pm 0.07$ (SEM), $t(379) = -2.39, p = 0.02$]. On average, they did not feel significantly more or less motivated [*motivation*: $M = 0.12 \pm 0.09$ (SEM), $t(379) = 1.39, p = 0.17$], nor experienced more (or less) psychological pressure [*pressure*: $M = 0.09 \pm 0.09$ (SEM), $t(379) = 1, p = 0.32$].

Within-factor measures were consistent. Indeed, the subjective report of change in *physical constraints* was correlated with the *space per cohabitant* [$M(\text{space per cohabitant}) = 1.19 \pm 0.03$ (SEM); $r(378) = 0.10, p = 0.049$], the subjective report of change in *loneliness* was correlated with the quantitative change in *social interactions* [$M(\text{change in interactions}) = -0.22 \pm 0.07$ (SEM), $t(379) = -3.31, p = 0.001$;

$r(378) = 0.18, p = 0.005$]. The subjective report of change in *free time* was correlated with the *number of working hours* per week (20% worked more than 42 h/week, 19% between 36 and 42 h/week, 15% between 29 and 35 h/week, 13% between 22 and 28 h/week, 14% between 15 and 21 h/week, 9% between 8 and 14 h/week, 10% less than 7 h/week, $r(291) = 0.53, p < 0.001$). Additionally, affective changes in *mood*, *motivation*, *anxiety and stress*, and *pressure* were all correlated to each other (all $p < 0.001$).

Subjective Creativity Changes During the Lockdown

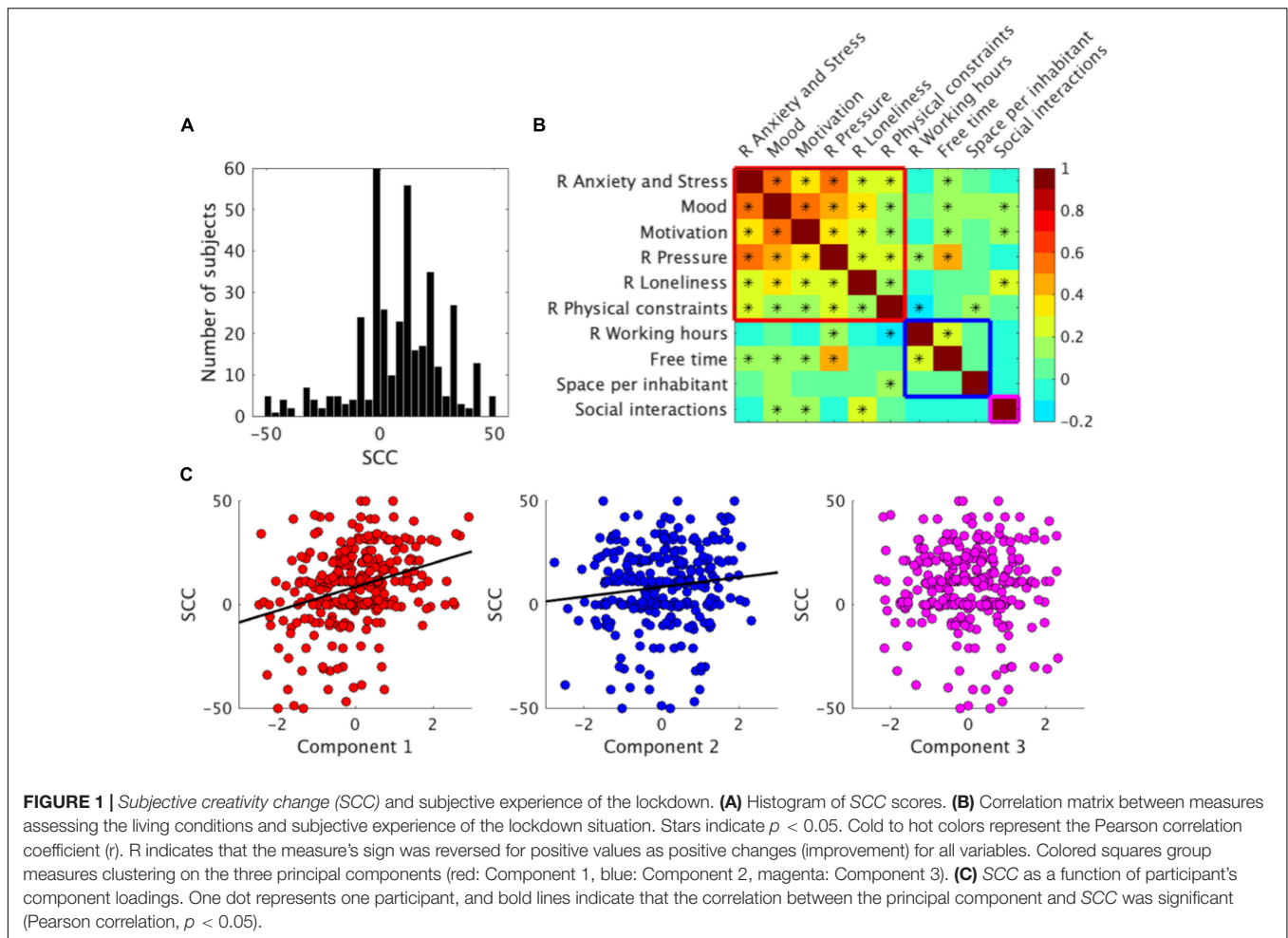
Measures of Creativity

When prompted to subjectively report how much they think their creativity changed during the lockdown (SCC, rating scale from -50 to 50), the participants declared on average to have been more creative during the lockdown period [$M = 8.08 \pm 0.98$ (SEM), $t(379) = 8.26, p < 0.001$] (**Figure 1A**).

Additionally, we collected two other measures of creativity, that were the *creativity rating score* (corresponding to the external creativity rating of the five most creative productions the participants carried out during the lockdown) and the *BFI-O* (assessing creative personality traits). *Creativity rating score* mean was 7.74 ± 0.21 (SEM) across the 286 participants who responded to that question, and *BFI-O* questionnaire was on average 3.68 ± 0.03 (SEM). The *BFI-O* scores, *creativity rating score* and SCC were all significantly pairwise correlated [$r_{BFI-O-creativity\ rating\ score}(378) = 0.46, p < 0.001, r_{BFI-O-SCC}(378) = 0.21, p = 0.03, r_{SCC-creativity\ rating\ score}(378) = 0.15, p = 0.009$]. Hence, as the *creativity rating score* might reflect both the creative personality traits and creativity changes during the lockdown, we tested whether *BFI-O* scores could be a hypothetical mediator of the correlation between SCC and *creativity rating score*. The mediation analysis revealed that the correlation between SCC and *creativity rating score* could potentially be mediated by the *BFI-O* scores, as we observed a loss of significance of the direct path when including the mediator effect (linear regression of SCC against *creativity rating score* (without the mediator): $\beta_{SCC-creativity\ rating\ score} = 0.68, p = 0.009$ [$F(1, 284) = 7.05, p = 0.008, R^2 = 0.024$]; linear regression of SCC against *creativity rating score* and *BFI-O* (the mediator): $\beta^*_{SCC-creativity\ rating\ score} = 0.37, p = 0.20$; $F(2, 283) = 6.23, p = 0.002, R^2 = 0.042$). The difference between $\beta_{SCC-creativity\ rating\ score}$ and $\beta^*_{SCC-creativity\ rating\ score}$ was confirmed using bootstrapping [95% Confidence Interval CI = (0.010.62)]. Since our main aim was to assess the creativity change related to the lockdown, we decided to use the SCC score as our main variable of interest, as *creativity rating score* seems to reflect more the creative personality traits than the change in creativity during the lockdown period, and because baseline measurement of *creativity rating score* was not available.

Relations Between Subjective Creativity Change and Subjective Experience During the Lockdown

We explored the link between SCC and the variables reflecting the living conditions and subjective experience of the lockdown situation. To reduce our set of variables into a smaller set



of dimensions, we conducted a PCA on the ten variables of interest using the available complete data from 293 participants (see section “Materials and Methods”). The Kaiser–Meyer–Olkin measure was 0.75, above the acceptable limit of 0.5. Three factors had eigenvalues over one and, in combination, explained 56.48% of the variance. **Figure 1B** shows the correlation matrix between variables, and **Table 2** shows the components loadings after rotation. The variables that cluster on the same component suggest that component 1 represents affective changes during the lockdown, component 2 represents changes in the available time, and component 3 interactions with other people.

We searched for correlations between the participant's components loadings and SCC. SCC correlated significantly with component 1 representing affective changes during lockdown [$r(291) = 0.30, p < 0.001$] and with component 2 representing changes in time available [$r(291) = 0.12, p = 0.033$], but not with component 3 representing interactions with other people [$r(291) = 0.003, p = 0.96$] (**Figure 1C**). Individual correlations of each variable and SCC are provided in **Supplementary Table 4**. These results indicate that two main factors were associated with SCC during the lockdown period: affective changes and change in the available time. Restrictions in social interactions were not significantly associated with creativity changes.

As creativity could help cope with difficult situations and regulate emotions, we first explored whether creative personality

TABLE 2 | Summary of exploratory principal component analysis results for the variables hypothetically related to creativity changes during the lockdown period ($n = 293$).

	Component 1 Affective change	Component 2 Available time	Component 3 Interactions
R Anxiety and stress	0.72	0.12	-0.28
Mood	0.82	0.13	0.00
Motivation	0.70	0.09	0.13
R Pressure	0.57	0.55	-0.19
R Loneliness	0.68	-0.12	0.23
R Physical constraints	0.46	-0.31	-0.25
R Working hours	-0.11	0.77	0.03
Free time	0.27	0.71	-0.02
Space per cohabitant	0.20	-0.21	-0.49
Social interactions	0.34	-0.20	0.81
Eigenvalues	3.036	1.527	1.086
% of variance	30.36	15.27	10.86

Loadings greater than 0.4 are in bold.

traits could be linked to the subjective and affective experience of the lockdown. We found a significant correlation between *BFI-O* and component 1 (representing affective changes during lockdown) [$r(291) = 0.19, p < 0.001$]. Then, to better understand how *BFI-O* could have impacted both changes, we conducted two mediation analyses with either component 1 (PC1) as a mediating variable of the relationship between *BFI-O* and SCC (Mediation PC1), or SCC as a mediating variable of the relationship between *BFI-O* and component 1 (Mediation SCC). The results of Mediation SCC showed a significant partial mediation with a decrease in the direct path when including the mediator effect (linear regression of SCC against *BFI-O* (without the mediator): $\beta_{BFI-O-PC1} = 0.03, p < 0.001; F(1, 291) = 11.37, p < 0.001, R^2 = 0.038$; linear regression of PC1 against SCC and *BFI-O*: $\beta^*_{BFI-O-PC1} = 0.02, p = 0.02; F(2, 290) = 17.80, p < 0.001, R^2 = 0.109$). The difference between $\beta_{BFI-O-PC1}$ and $\beta^*_{BFI-O-PC1}$ was confirmed using bootstrapping [95% CI = (0.005 0.018)]. The results of Mediation PC1, did not reveal any significant mediation of *BFI-O* and SCC by PC1 [CI = (-0.13 0.29)]. Hence, individuals with higher openness may potentially had a better affective experience partially because they have felt more creative to during the lockdown.

Regarding demographic and other categorical factors, there was no significant effect of gender [$F(1, 378) = 0.01, p = 0.93$], age [$r(378) = -0.02, p = 0.69$], education [$\rho(378) = 0.04, p = 0.44$], socio-professional category [$F(8, 350) = 1.45, p = 0.17$], socio-professional domain [$F(19, 339) = 0.64, p = 0.88$], or residential area [$F(2, 377) = 0.43, p = 0.65$] on SCC (see **Table 1**). Being at home [$F(1, 378) = 0, p = 0.99$], having a job related to COVID-19 [$F(1, 378) = 0, p = 0.99$], or working remotely [$F(1, 378) = 0.56, p = 0.46$] had also no significant association with SCC.

Change in Creative Activities

In the survey, we qualitatively and quantitatively assessed the creativity change experienced during the lockdown. In total, 343 participants were presented with 28 activities (among them, 37 participants completed an older version of the questionnaire that included additional questions not considered here). All activities are reported in **Supplementary Table 2**. The 28 activities were selected based on existing items in other validated creativity questionnaires (see section “Materials and Methods”) and were framed in terms of creative activities, with phrasing such as “I created . . .” or “I invented . . .” For each of them, participants were first asked to indicate whether they had performed the activity during the last 5 years (lockdown included). If so, they were asked whether they did it during the lockdown and how often (more or less than before), for which reasons (various reasons were proposed for negative and positive frequency changes), and how they valorized it. For each activity that was less performed during the lockdown than before, the participants were asked whether they thought more or less about it during the lockdown.

Activities

We identified activities that were relevant at the participant level to further estimate a lockdown-related change. On average, participants engaged in 8.38 ± 0.25 (SEM) activities (out of the 28

proposed) during the previous 5 years (including the lockdown period). Three participants did not engage in any activity, and four participants engaged in more than 20 activities. All the activities were performed at least by 9.9% of the participants during the lockdown (**Figure 2**). The activities of our list were consistent with the top-productions that the participants freely reported (see “Top-production” section below).

We also quantified the changes that occurred during the lockdown for each activity performed in the last 5 years (**Figure 2**). Among the activities performed during the last 5 years, the five activities with the highest increase in frequency during the lockdown across participants were “Cooking and drink recipes” (67.1% of the participants, $n = 233$), “Sports program” (65.7%, $n = 140$), “Dance and choreography” (61.3%, $n = 31$), “Mutual aid initiatives” (59.3%, $n = 27$) and “Garden or floral arrangement” (58.1%, $n = 211$). Activities with the deepest decrease in frequency during the lockdown were “Jewelry design” (86.7%, $n = 45$), “Original sculpture or alike” (82.4%, $n = 34$), “Furniture making” (64.5%, $n = 75$), “Decoration creation” (52.5%, $n = 176$), and “Object making, craft” (52.1%, $n = 96$).

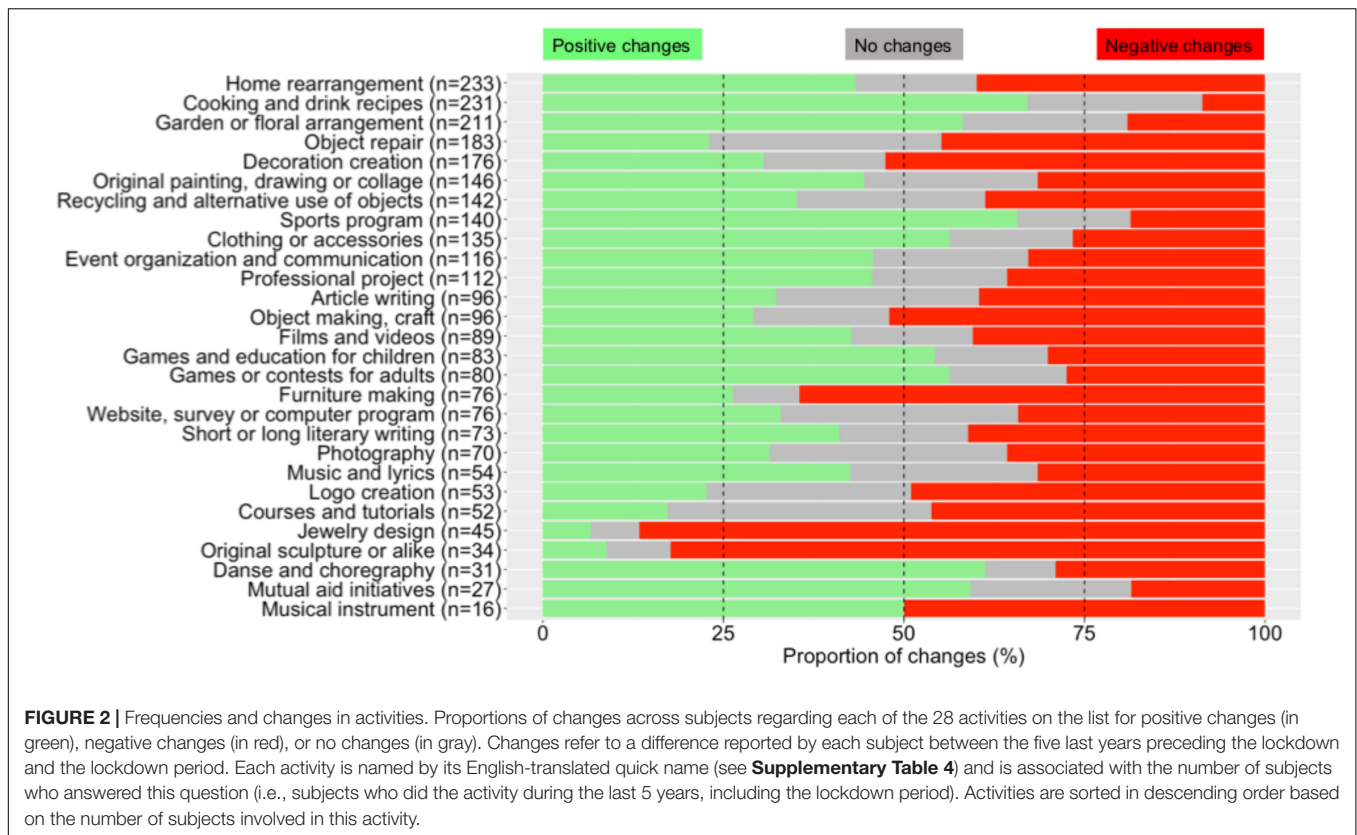
Quantitative Changes in Activities During the Lockdown Period

To quantify the overall changes in performing creative activities during the lockdown (based on our list of 28 activities), we computed an *activity frequency change score* for each subject (**Figure 3A**). On average, 40.3 ± 1.5 (SEM)% of the activities performed by the participants during the last 5 years were carried out more frequently during the lockdown, and additionally, $5.2 \pm 0.7\%$ of the activities were new ones. Conversely, $20.2 \pm 1.3\%$ were carried out at the same frequency, $2.7 \pm 0.4\%$ less frequently, and $20 \pm 1.2\%$ were not performed at all during the lockdown. Another $11.8 \pm 0.2\%$ of the activities were not performed, but the participants thought about it during the lockdown period. The proportions of activities that were more (positive changes), less (negative changes), and equally (no change) performed during the lockdown differed significantly [$F(2, 678) = 49, p < 0.001$ with Greenhouse–Geisser correction; **Figure 3B**]. *Post hoc* Tukey tests revealed significant differences between all pairwise comparisons ($p_{corr} < 0.001$). Importantly, the mean *activity frequency change score* was significantly correlated with SCC [$\rho(329) = 0.23, p < 0.001$; **Figure 3C**].

Reasons and Motives

To examine why each activity was more or less frequently performed during the lockdown than before, we analyzed the reasons provided by the participants for positive and negative changes separately (**Figure 4**). Note that they could select several reasons for each activity during the survey. Across all activities, the frequency with which the different reasons for positive changes were selected significantly differed [$F(6, 1,722) = 152, p < 0.001$ with Greenhouse–Geisser correction; **Figures 4A,B**].

The most frequently selected categories of reasons for positive changes were: (1) having more free time (“More time,” 60 ± 2.3 (SEM)% of the activities carried out by each subject); free time significantly differed from each of the other reasons ($p_{corr} < 0.05$ for all *post-hoc* tests); (2) being inspired by the lockdown



situation (“Inspired,” $21.3 \pm 1.7\%$); and (3) having to solve lockdown/pandemic issues (“Problem solving,” $20.8 \pm 1.6\%$). The frequency of those two last reasons did not statistically differ but was higher than the frequency of each of the remaining reasons ($p_{corr} < 0.05$ for all corresponding *post-hoc* tests). Additionally, $12.3 \pm 1.3\%$ of the activities performed more often than before were carried out for work (“Work related”), and $11.1 \pm 1.3\%$ for other undetermined reasons (“Others”). The less impactful reasons were to feel better (“Wellbeing”) and that the conditions of lockdown were favorable to this activity (“Favorable conditions”) ($p_{corr} < 0.05$ for all *post-hoc* tests, when compared to the other reasons).

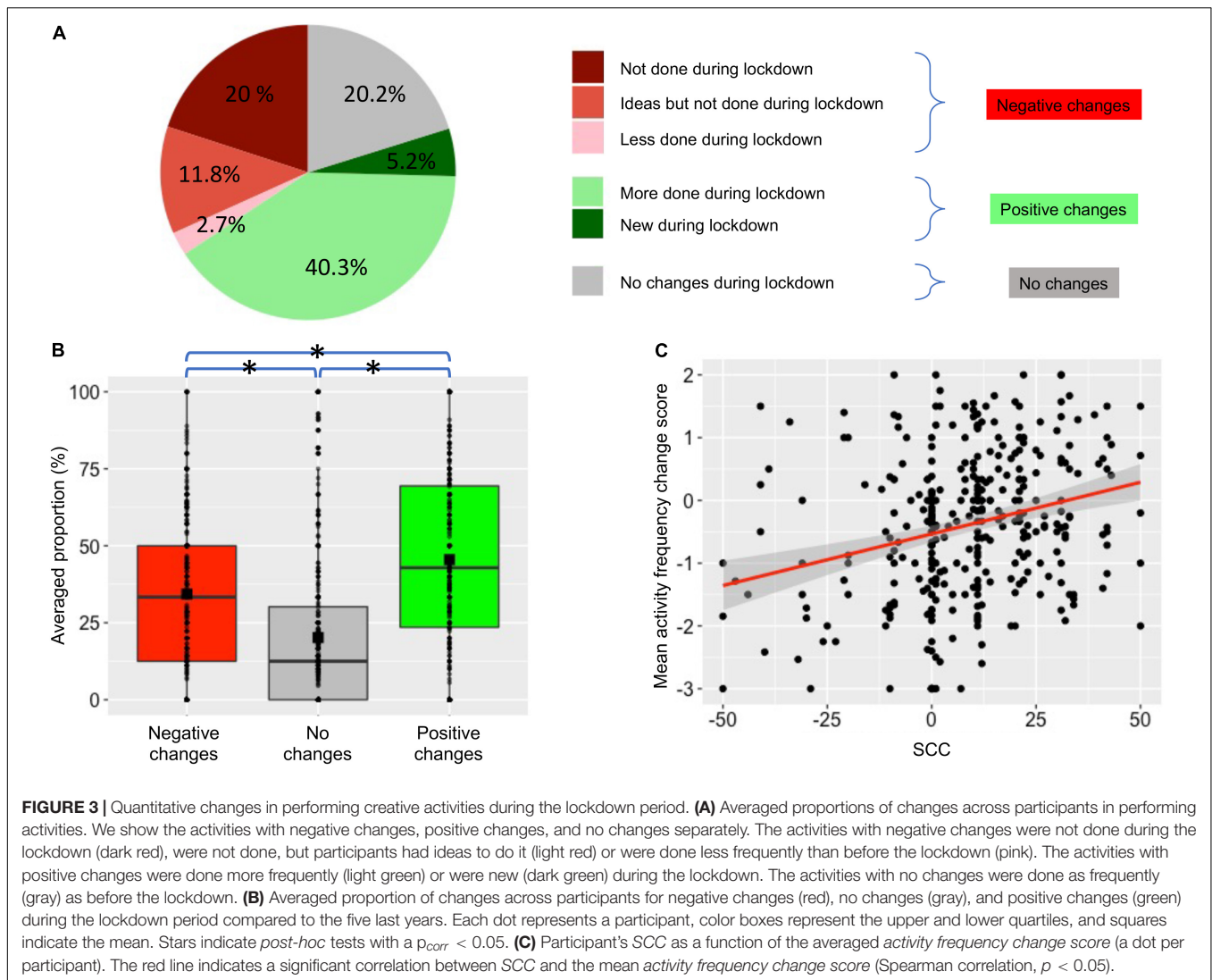
Among the reasons for negative changes, the frequency of the reported categories of reasons significantly differed [$F(7, 1925) = 14, p < 0.001$ with Greenhouse–Geisser correction; **Figure 4D**]. The most selected reasons for carrying out an activity less frequently than before were: (1) having other concerns or worries (“Concerns and worries,” $18.8 \pm 1.7\%$), (2) not having favorable conditions (“Unfavorable conditions,” $15.3 \pm 1.6\%$), (3) not willing or not feeling like doing it (“Did not feel like it,” $14.1 \pm 1.6\%$), (4) lacking the necessary material to do it (“Lack of resources,” $13.1 \pm 1.5\%$), (5) not having enough time to do it (“No time,” $13.3 \pm 1.6\%$). The frequency of those five main reasons did not statistically differ from each other ($p_{corr} > 0.05$ for all *post-hoc* tests). However, the frequency of each of these reasons differed significantly from the remaining reasons that were: not having ideas for this activity (“Lack of ideas,” $3 \pm 0.8\%$), that this activity was performed only occasionally before and was not

common for the participant (“Occasionally,” $6.3 \pm 1.1\%$), or other undetermined reasons (“Others,” $7.9 \pm 1.2\%$) ($p_{corr} > 0.05$ for all *post-hoc* tests).

To check the consistency of the participant’s responses to the first part of the survey (global experience of the lockdown) and the second part (activity-based questions), we explored whether the activity-based reported reasons correlated with the global subjective experience of the lockdown. The difference between selecting “Inspired” for positive reasons and “Concerned and worries” or “Did not feel like it” for negative reasons was correlated with Component 1 (reflecting affective experience) across individuals [$r(280) = 0.12, p = 0.04$]. Additionally, we found that the difference between selecting “More time” for positive reasons and “No time” for negative reasons was correlated with Component 2 (reflecting more free time) across individuals [$r(280) = 0.51, p < 0.001$] (see section “Materials and Methods” and **Supplementary Figure 2**).

Obstacles

For each activity carried out more frequently or as often as before the lockdown, participants were asked how many obstacles they had to overcome to conduct this activity (on a scale ranging from 0 to 100). The overall mean *obstacle score* was 15.44 ± 0.79 (SEM). The mean *obstacle score* was not significantly correlated to SCC [$r(329) = -0.04, p = 0.49$]. However, using a polynomial fit of second-order, we identified a quadratic relationship between those two measures [$\beta_{quad} = 0.004 \pm 0.001$ (SE), $t(328) = 2.82, p = 0.005$; $\beta_{lin} = -0.07 \pm 0.04, t(328) = -1.56, p = 0.12$; $F(2,$



328) = 4.26, $p = 0.015$, $R^2 = 0.025$] (**Supplementary Figure 3**), suggesting that the amount of encountered obstacle was high for individuals experiencing a large negative or positive SCC.

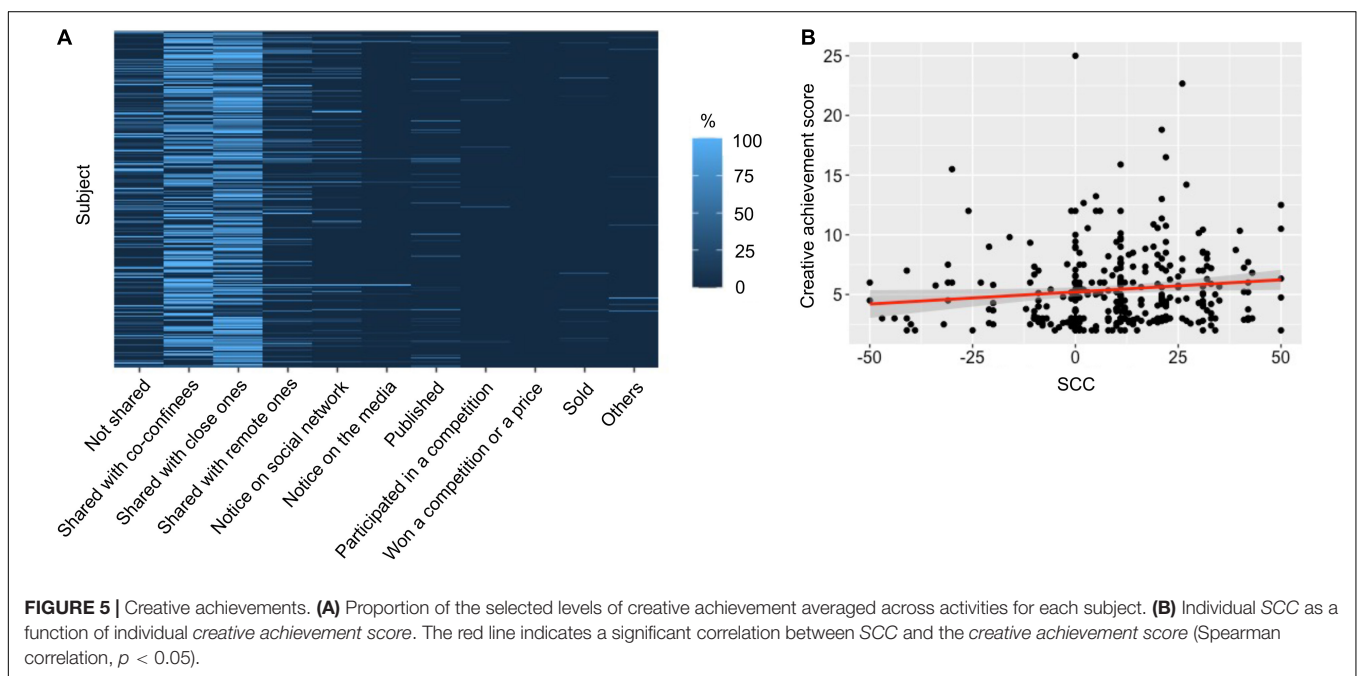
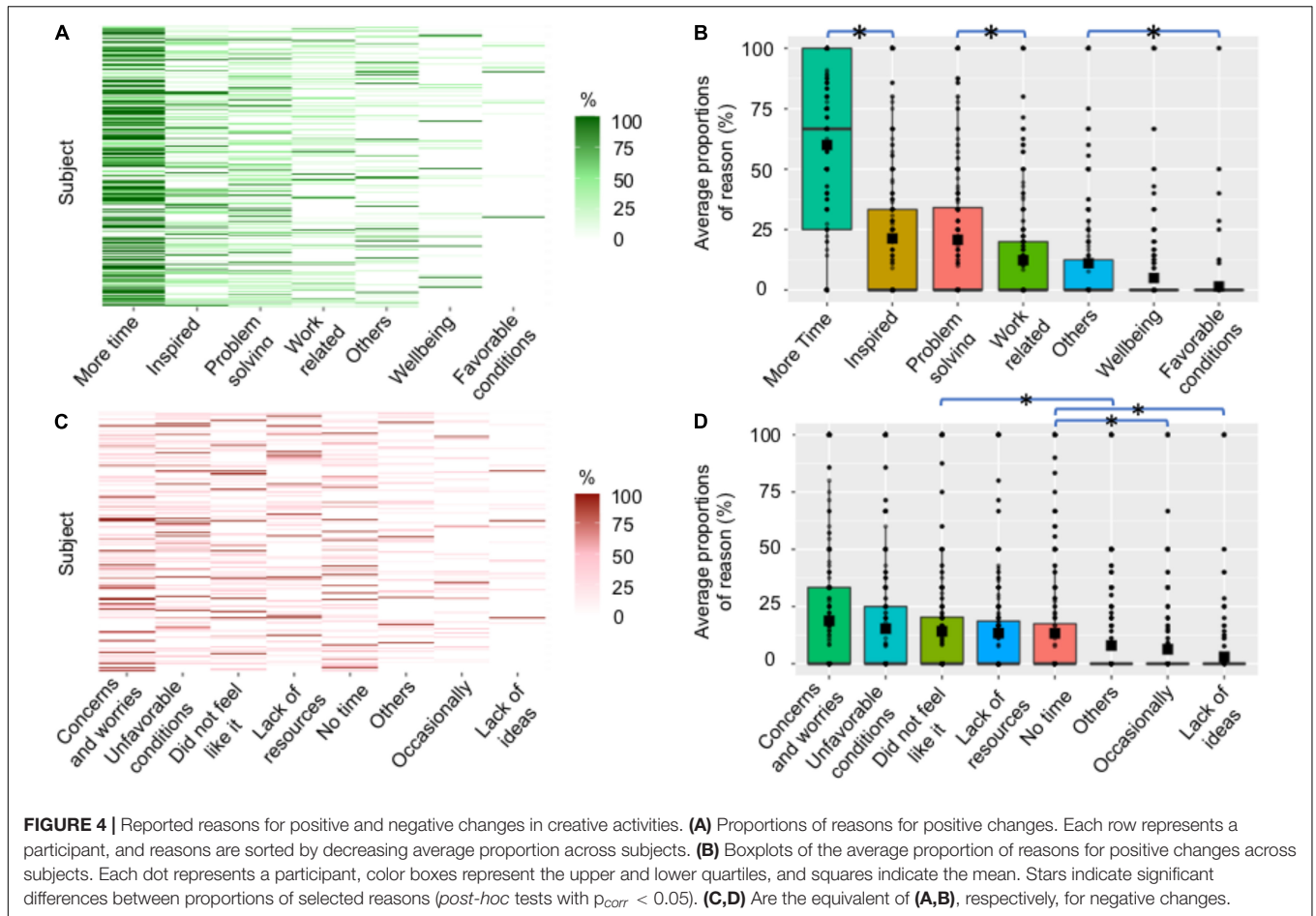
Creative Achievements

In this survey, we estimated, for each participant, the level of creative achievements for the activities performed during the lockdown by adapting items of an achievement questionnaire (ICAA, part 2; Diedrich et al., 2017; **Figure 5** and **Supplementary Table 3** for details). For the activities carried out more frequently or as often during the lockdown as before, we asked the participants to report how they valorized their activities. The participants reported that for $53.98 \pm 1.80\%$ of the activities they carried out, they shared the result with family, friends, or colleagues, and $16.96 \pm 1.47\%$ were shared with no one. For $11.08 \pm 1.09\%$ of the performed activities, the results were communicated to the participant's remote social network. Among higher achievements, the participants reported that the result of their activity was noticed outside of their usual network for

$5.89 \pm 0.81\%$ of their activities, published for $4.28 \pm 0.66\%$, or mentioned in the media for $1.27 \pm 0.43\%$. Other achievements represented less than 1% of the activities each. Importantly, based on the level of achievement reported by the participants, we computed a *creative achievement score* per participant (see "Materials and Methods"), and we found that it was significantly correlated with SCC [$\rho(298) = 0.16$, $p = 0.004$].

Top-Productions

At the end of the survey, participants were asked to freely report their most creative productions (up to five) during the lockdown. To check the validity of our list of activities, we examined whether each of the 1,091 reported top-productions corresponded to an activity included in our list. We found that 90% of the top-productions reported by the participants were in the list (with a $M \pm SEM$ *creativity rating score* of 2.1 ± 0.03 on a rating scale from 0 to 5). Moreover, among the 10% of the top-productions that were not referring to an activity included in our list, 83.5% had a *creativity rating score* lower than 2.5 (with a $M \pm SEM$



creativity rating score of 1.3 ± 0.1). The majority of those low-rated top-productions were about “learning something new,” “storing/classifying,” “reading,” and “projects/ideas.” Among the top-productions not covered by our list, the top-productions with a score higher than 2.5 (18 productions) were about ecology ($n = 3$), artistic projects or ideas ($n = 4$), and diverse multimedia creations ($n = 3$).

To analyze the frequency of the productions among the participants, we recoded the name of the top-productions and selected the ones with a mean *creativity rating score* higher than 0.5. “Cooking and recipes” were the most frequent realizations (reported by 31% and 19% of the participants), followed by “Writing” (25%), “Manufacturing” (19%), “Gardening” (18%), and “Sewing” (13%).

DISCUSSION

Using an online survey, we aimed to understand the impact of the COVID-19-related lockdown in French-speaking population on creativity and the main factors explaining this impact. Our main *a priori* factors were the affective states, available time, personal conditions of lockdown, and social isolation. Our survey used two main approaches to quantify individual creativity changes: subjective self-rated creativity changes (SCC), and activity-based measures. Our study documents the unprecedented situation we all had to face during the lockdown and sheds new lights on potential factors that could have modulated individual creative behavior.

Creativity During the Lockdown

SCC analyses revealed that participants experienced being more creative during the lockdown than the period before, which is consistent with previous studies that reported an increase in everyday creativity during the lockdown (Karwowski et al., 2021; Mercier et al., 2021; Morse et al., 2021). Lockdown-related creativity changes using the activity-based questionnaire approach were also consistent with the SCC report. Notably, both the *activity frequency score* and the *creative achievement score*, correlated with SCC, indicating that SCC related to changes in creative activities and achievements. We also found a quadratic relationship between the amount of obstacles to overcome to achieve an activity assessed by activity-based questionnaire (*obstacle score*) and SCC: individuals who declared having a decrease in their creativity had to face too many obstacles while individuals experiencing an increase in their creativity might have been stimulated by the amount of obstacles. This result may suggest that creative behaviors differed according to the perception or the nature of an obstacle. Individual factors that influence our creative behavior in facing obstacles remain to be explored. As the SCC came early in the survey, before asking participants about the activities they engaged in during the lockdown, it is unlikely that activity-based questions influenced our SCC measure (Karwowski et al., 2019).

In addition, SCC correlated with the *BFI-O* score, which captures a basal creative personality trait (Jauk et al., 2014; Beaty et al., 2017), openness, and which was in the range

previously observed (Denissen and Penke, 2008). The linear relationship between SCC and *BFI-O* indicates that individuals with higher openness to new experiences reported proportionally more positive self-rated creativity changes. Measures of creative confidence beliefs, such as self-rated creativity, classically correlate with openness (Karwowski and Lebeda, 2016), which is considered as a big five personality trait that impacts creative self-efficacy and self-concept.

We also assessed creativity during the lockdown using an external rating approach of the top-5 creative productions freely reported by the participants (*creativity rating score*). SCC correlated positively with this measure, indicating that the participants who reported a higher increase in their creativity also had higher creativity ratings of their top-productions. Interestingly, *BFI-O* mediated the relationship between SCC and *creativity rating score*, suggesting that creativity during the lockdown (i.e., external ratings of the participants' productions) depended on both a basal creative personality trait (*BFI-O*) and the subjective feeling of lockdown-related changes in creativity (SCC).

Overall, these findings indicate that our self-rated measure SCC relates to creative personality traits and several creativity measures based on real-life activities and achievements, in accordance with the model of primary and secondary creativity (Runco and Beghetto, 2019) and can capture event-related changes in creativity. SCC may be an interesting measure of real-life creative changes that remains to be validated in future cognitive studies measuring changes with baseline comparison.

Activities Carried Out During the Lockdown: Quantitative and Qualitative Aspects

Our activity-based questionnaire offered an overview of the participants' engagement in creative activities during the lockdown and related changes using a list of 28 predefined activities. We also asked them to freely report their five most creative productions during the lockdown. Overall, 90% of the self-reported top-productions corresponded to activities included in our list, suggesting that our list was indeed representative of the activities performed during the lockdown period. “Home rearrangement,” “Cooking and drinks recipes,” and “Garden or floral arrangement” were the three activities in which participants engaged the most. These creative activities were consistent with a pre-pandemic study that assessed the frequency of creative activities in several domains (Benedek et al., 2019).

The activity-based analysis revealed a global quantitative increase in carrying out creative activities during the lockdown, which is consistent with the increase in self-rated creativity shown by the SCC results. The activities with the highest increase in frequency were “Cooking and drinks recipes,” “Sports program,” “Dance and choreography,” “Mutual aid initiatives,” and “Garden and floral arrangement.” This result echoes studies in other countries showing that individuals increased their cooking and baking activities (Gerritsen et al., 2020), physical training (Di Renzo et al., 2020) during the lockdown. For the

explored activities, the *creative achievement score* of each subject was relatively low, indicating that our questionnaire assessed “everyday creativity” rather than extraordinary achievements. Nevertheless, the significant correlations of the *activity frequency change score* and SCC, combined with the fact that top productions of the participants broadly corresponded to activities in our list, suggest that our activity-based measure captured not only the quantity of activities but also likely their creativity.

Potential Reasons for the Impact of the Lockdown Situation on Creativity

We explored how several factors could be related to creativity changes. No demographic factors correlated with the SCC. However, using PCA, we found that the two first principal components of the lockdown conditions and subjective experience significantly correlated with SCC. The first component that we labeled “affective change” included *anxiety and stress, motivation, psychological pressure, mood*, and to a lower extent, *loneliness and physical constraints*. The relationship between this first component and SCC is consistent with a series of studies showing that affective states such as positive mood and motivation are associated with higher creativity (Collins and Amabile, 1999; Baas et al., 2008) and that intrinsic motives drive everyday creative activities (Benedek et al., 2019). Conversely, negative affective states hindered creativity in some individuals. This result is also consistent with a recent studies showing a relationship between positive affective states during the lockdown and creativity (Elisondo, 2021; Hofreiter et al., 2021). Our survey shows that overall, our participants reported more negative subjective and affective experiences during this period than before. This finding converges with other studies conducted worldwide during the lockdown of Spring 2020 that showed that people experienced an increase in stress and depression symptoms in Italy (Roma et al., 2020), Spain (Ozamiz-Etxebarria et al., 2020), New Zealand (Every-Palmer et al., 2020), Kuwait (Burhamah et al., 2020), and Croatia (Đogaš et al., 2020). Interestingly, we found a significant mediation effect of SCC on the relationships between *BFI-O* and the first principal component (reflecting affective changes). This result suggests that higher openness may have facilitated creativity expression in during the lockdown, which in turn may have help to cope with difficult psychological situations (Wu et al., 2019). Hence, creative traits and abilities may be essential to resilience. Note that significant mediation effects does not mean that we identified a true causal effect, instead, it places some variables as candidates for causal mediators, that should be experimentally addressed (Fiedler et al., 2011, 2018).

The second principal component that correlated with SCC reflected the available time, including the *number of working hours, free time*, and to a lower extent, *space per cohabitant*. An increase in free time was linked to higher creativity change. This finding is in agreement with studies that investigated the time pressure as hindering creativity (Amabile et al., 1996, 2002). Note that the strength of correlation between SCC and the second principal component (change in available time) was not as strong as the correlation with the first principal component

(change in affective state), suggesting that the available time did not impact as much as the affective change on creativity during the lockdown.

It is important to mention that given the correlational nature of the relationship between change in creativity and affective change, we cannot conclude about any causality effect: more positive affective states could trigger higher creativity, but the reverse could be true, or another unknown variable could mediate this correlation. However, the coherence of our findings based on two different sets of measures is to be highlighted. In addition to a global subjective report of their self-perceived emotions, free time, and creativity, the participants indicated the reasons why they achieved or gave up specific creative activities during the lockdown. The reasons for carrying out an activity more frequently were dominated by more free time, while the reasons for carrying out an activity less frequently were mainly related to concerns and worries. The individual proportion of these reasons correlated with the individual component loadings of the two first principal components (reflecting affective state and free time) identified among the subjective experience factors that we collected. These results indicate strong consistency between the different parts of our questionnaire.

Overall, the correlations of SCC with the reported affective and free time changes on the one hand, and the identified reasons for engaging more or less frequently in creative activities during the lockdown than before on the other, converge to the crucial role of emotions and free time on creativity during this period. The exact nature and context of the affective factors remain to be clarified.

Limitations

One potential limitation of our study is that our sample is not fully representative of the French population. For instance, our sample had more women, with a high education level, and most of them could work remotely. It is also possible that individuals who participated in this survey were inherently interested in creativity or had more time for online surveys. Thus, the increase of creativity observed in this sample might not be replicable in other populations, such as individuals who could not work remotely or had no time to answer online surveys. In addition, the participants responded just after the end of the lockdown, their reports are thus retrospective and may lack accuracy or objectivity. Yet, it is worth mentioning that most surveys used questions regarding the actual lockdown period, with difficulties in measuring a valid baseline, while in our study, we focused on the change between before and during the lockdown.

CONCLUSION

The massive lockdown provoked by the COVID-19 pandemic gave an exceptional opportunity to investigate how various factors and exceptional situations could impact everyday creativity. Our study documents this unique situation regarding creativity, creativity enablers, and blockers based on the description of how individuals experienced this situation and how they adapted their everyday creative activities. Our subjective report of self-rated creativity and activity-based

questionnaire provide converging results supporting an overall positive change in creativity during the lockdown period, which was mainly related to having more free time or opportunities. However, the changes were heterogeneous across participants, and when negative changes in self-rated creativity or creative activities were reported, they were mainly related to negative affective factors. A creative personality may have partially helped to better express one's creativity, and to cope with the negative emotions induced by the crisis. Those factors have thus to be considered when trying to enhance creativity or well-being in individuals and society. Our observations may provide interesting hypothesis to explore in future studies for a better understanding of the affective, emotional, and wellbeing dimensions that modulate our creativity, which could inspire political, societal or management decisions.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The datasets presented in this study can be found in online repositories. The names of the repository/repositories and accession number(s) can be found below: <https://osf.io/XBR78/>. A Matlab Application is also available to explore the dataset and reproduce all results presented in the article.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by Comité d'Evaluation Ethique de l'INSERM. The participants provided their written informed consent to participate in this study.

REFERENCES

- Amabile, T. M. (1983). The social psychology of creativity: a componential conceptualization. *J. Pers. Soc. Psychol.* 45, 357–376. doi: 10.1037/0022-3514.45.2.357
- Amabile, T. M. (2018). *Creativity in Context: Update to the Social Psychology of Creativity*. Milton Park: Routledge.
- Amabile, T. M., Conti, R., Coon, H., Lazenby, J., and Herron, M. (1996). Assessing the work environment for creativity. *Acad. Manage. J.* 39, 1154–1184. doi: 10.5465/256995
- Amabile, T. M., Mueller, J. S., Simpson, W. B., Hadley, C. N., Kramer, S. J., and Fleming, L. (2002). *Time Pressure and Creativity in Organizations: a Longitudinal Field Study*. HBS Working Paper # 02-073. Available online at: http://www.hbs.edu/faculty/Publication%20Files/02-073_03f1ec6a-789d-4ce1-b594-e74aa4057e22.pdf (accessed September 13, 2020).
- Amabile, T. M., and Pillemer, J. (2012). Perspectives on the social psychology of creativity. *J. Creat. Behav.* 46, 3–15. doi: 10.1002/jocb.001
- Baas, M., De Dreu, C. K. W., and 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. doi: 10.1037/a0012815
- Beatty, R. E., Chen, Q., Christensen, A. P., Qiu, J., Silvia, P. J., and Schacter, D. L. (2017). 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. doi: 10.1002/hbm.23884
- Beghetto, R. A. (2006). Creative self-efficacy: correlates in middle and secondary students. *Creat. Res. J.* 18, 447–457. doi: 10.1207/s15326934crj1804_4
- Beghetto, R. A. (2021). How times of crisis serve as a catalyst for creative action: an agentic perspective. *Front. Psychol.* 11:600685. doi: 10.3389/fpsyg.2020.600685

AUTHOR CONTRIBUTIONS

TB, MO-T, EV, and AL-P performed the data analyses and wrote the manuscript. AL-P designed the open MatLab App. All authors designed the online survey, collected the data, discussed the results, and commented the manuscript.

FUNDING

EV was funded by the “Agence Nationale de la Recherche” (grant no. ANR-19-CE37-001-01), and the “Fondation pour la Recherche Medicale” (grant no. DEQ20150331725). The research also received funding from the program “Investissements d’Avenir” ANR-10- IAIHU-06. MO-T was funded by Becas-Chile of ANID (CONICYT).

ACKNOWLEDGMENTS

We thank all the participants to the survey. We thank Baptiste Barbot for his helpful comments on the structure of the survey.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.821550/full#supplementary-material>

- Benedek, M., Bruckdorfer, R., and Jauk, E. (2019). Motives for creativity: exploring the What and Why of everyday creativity. *J. Creat. Behav.* 54, 610–625. doi: 10.1002/jocb.396
- Bu, F., Steptoe, A., and Fancourt, D. (2020). Loneliness during a strict lockdown: trajectories and predictors during the COVID-19 pandemic in 38,217 United Kingdom adults. *Soc. Sci. Med.* 265:113521. doi: 10.1016/j.socscimed.2020.113521
- Burhamah, W., AlKhayyat, A., Oroszlányová, M., AlKenane, A., Almansouri, A., Behbehani, M., et al. (2020). The psychological burden of the COVID-19 pandemic and associated lockdown measures: experience from 4000 participants. *J. Affect. Dis.* 277, 977–985. doi: 10.1016/j.jad.2020.09.014
- Ceh, S. M., Edelmann, C., Hofer, G., and Benedek, M. (2021). Assessing raters: What factors predict discernment in novice creativity raters? *J. Creat. Behav.* 56, 41–54. doi: 10.1002/jocb.515
- Collins, M. A., and Amabile, T. M. (1999). “Motivation and creativity,” in *Handbook of Creativity*, ed. R. J. Sternberg (Cambridge, MA: Cambridge University Press).
- Davis, M. A. (2009). Understanding the relationship between mood and creativity: a meta-analysis. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 108, 25–38. doi: 10.1016/j.obhdp.2008.04.001
- 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. *J. Pers. Soc. Psychol.* 94, 739–756. doi: 10.1037/0022-3514.94.5.739
- Denissen, J. J. A., and Penke, L. (2008). Motivational individual reaction norms underlying the Five-Factor model of personality: first steps towards a theory-based conceptual framework. *J. Res. Pers.* 42, 1285–1302. doi: 10.1016/j.jr.p.2008.04.002
- Di Renzo, L., Gualtieri, P., Pivari, F., Soldati, L., Attinà, A., Cinelli, G., et al. (2020). Eating habits and lifestyle changes during COVID-19 lockdown: an Italian survey. *J. Transl. Med.* 18:229. doi: 10.1186/s12967-020-02399-5

- Diedrich, J., Jauk, E., Silvia, P. J., Gredlein, J. M., Neubauer, A. C., and Benedek, M. (2017). Assessment of real-life creativity: the Inventory of Creative Activities and Achievements (ICAA). *Psychol. Aesthet. Creat. Arts* 12, 304–316. doi: 10.1037/aca0000137
- Dogaš, Z., Kalcina, L. L., Dodig, I. P., Demirović, S., Madirazza, K., Valić, M., et al. (2020). The effect of COVID-19 lockdown on lifestyle and mood in Croatian general population: a cross-sectional study. *Croat. Med. J.* 61, 309–318. doi: 10.3325/cmj.2020.61.309
- Elisondo, R. C. (2021). Creative activities, emotions, and resilience during the COVID-19 pandemic: a longitudinal study from Argentina. *Public Health* 195, 118–122. doi: 10.1016/j.puhe.2021.04.017
- Every-Palmer, S., Jenkins, M., Gendall, P., Hoek, J., Beaglehole, B., Bell, C., et al. (2020). New Zealandal distress, anxiety, family violence, suicidality, and wellbeing in New Zealand during the COVID-19 lockdown: a cross-sectional study. *PLoS One* 15:e0241658. doi: 10.1371/journal.pone.0241658
- Fiedler, K., Harris, C., and Schott, M. (2018). Unwarranted inferences from statistical mediation tests – An analysis of articles published in 2015. *J. Exp. Soc. Psychol.* 75, 95–102. doi: 10.1016/j.jesp.2017.11.008
- Fiedler, K., Schott, M., and Meiser, T. (2011). What mediation analysis can (not) do. *J. Exp. Soc. Psychol.* 47, 1231–1236. doi: 10.1016/j.jesp.2011.05.007
- Fischer, C., Malycha, C. P., and Schafmann, E. (2019). The influence of intrinsic motivation and synergistic extrinsic motivators on creativity and innovation. *Front. Psychol.* 10:137. doi: 10.3389/fpsyg.2019.00137
- Gerritsen, S., Egli, V., Roy, R., Haszard, J., Backer, C. D., Teunissen, L. et al. (2020). Seven weeks of home-cooked meals: changes to New Zealanders' grocery shopping, cooking and eating during the COVID-19 lockdown. *J. R. Soc. N. Z.* 51, S4–S22. doi: 10.1080/03036758.2020.1841010
- Hocevar, D. (1979). "The Development of the Creative Behavior Inventory (CBI)," *Paper Presented at Annual Meeting of the Rocky Mountain Psychological Association*. Washington, DC.
- Hofreiter, S., Zhou, X., Tang, M., Werner, C. H., and Kaufman, J. C. (2021). COVID-19 Lockdown and creativity: exploring the role of emotions and motivation on creative activities from the Chinese and German perspectives. *Front. Psychol.* 12:617967. doi: 10.3389/fpsyg.2021.617967
- Jauk, E., Benedek, M., and Neubauer, A. C. (2014). The road to creative achievement: a latent variable model of ability and personality predictors. *Eur. J. Pers.* 28, 95–105. doi: 10.1002/per.1941
- Kapoor, H., and Kaufman, J. C. (2020). Meaning-Making through creativity during COVID-19. *Front. Psychol.* 11:595990. doi: 10.3389/fpsyg.2020.595990
- Karwowski, M., and Barbot, B. (2016). "Creative self-beliefs: their nature, development, and correlates," in *Creativity and Reason in Cognitive Development*, eds J. C. Kaufman and J. Baer, (Cambridge, MA: Cambridge University Press).
- Karwowski, M., Han, M.-H., and Beghetto, R. A. (2019). Toward dynamizing the measurement of creative confidence beliefs. *Psychol. Aesthet. Creat. Arts* 13, 193–202. doi: 10.1037/aca0000229
- Karwowski, M., and Lebeda, I. (2016). The big five, the huge two, and creative self-beliefs: a meta-analysis. *Psychol. Aesthet. Creat. Arts* 10, 214–232. doi: 10.1037/aca0000035
- Karwowski, M., and Lebeda, I. (2017). "Creative self-concept: a surface characteristic of creative Personality," in *The Cambridge Handbook of Creativity and Personality Research* eds G. J. Feist, R. Reiter-Palmon, and J. C. Kaufman, (Cambridge, MA: Cambridge University Press).
- Karwowski, M., Zielińska, A., Jankowska, D. M., Strutyńska, E., Omelańczuk, I., and Lebeda, I. (2021). Creative Lockdown? A daily diary study of creative activity during pandemics. *Front. Psychol.* 12:600076. doi: 10.3389/fpsyg.2021.600076
- Li, W. W., Yu, H., Miller, D. J., Yang, F., and Rouen, C. (2020). Novelty seeking and mental health in Chinese University students before, during, and after the COVID-19 pandemic lockdown: a longitudinal study. *Front. Psychol.* 11:600739. doi: 10.3389/fpsyg.2020.600739
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., and Zenasni, F. (2015). *Psychologie de la Créativité*. Paris: Armand Colin.
- Lubart, T., Zenasni, F., and Barbot, B. (2013). Creative potential and its measurement. *Int. J. Talent Dev. Creat.* 1, 41–50.
- Mastria, S., Agnoli, S., Zanon, M., Lubart, T., and Corazza, G. E. (2018). Creative brain, creative mind, creative person. in *Exploring Transdisciplinarity in Art and Sciences*, eds Z. Kapoula, E. Volle, J. Renoult, and M. Andreatta, (Cham: Springer International Publishing).
- Mercier, M., Vinchon, F., Pichot, N., Bonetto, E., Bonnardel, N., Girandola, F., et al. (2021). COVID-19: A boon or a bane for creativity? *Front. Psychol.* 11:601150. doi: 10.3389/fpsyg.2020.601150
- Michinov, E., and Michinov, N. (2020). Stay at Home?! When personality profiles influence psychological adjustment and creativity during the COVID-19 Outbreak. *PsyArXiv* [Preprint]. doi: 10.31234/osf.io/wkhfr
- Morse, K. F., Fine, P. A., and Friedlander, K. J. (2021). Creativity and leisure during COVID-19: examining the relationship between leisure activities, motivations, and psychological well-being. *Front. Psychol.* 12:609967. doi: 10.3389/fpsyg.2021.609967
- Ng, T. W., and Feldman, D. C. (2012). A comparison of self-ratings and non-self-report measures of employee creativity. *Hum. Relat.* 65, 1021–1047. doi: 10.1177/0018726712446015
- Orkibi, H. (2021). Creative adaptability: conceptual framework, measurement, and outcomes in times of crisis. *Front. Psychol.* 11:588172. doi: 10.3389/fpsyg.2020.588172
- Ozamiz-Etxebarria, N., Dosil-Santamaria, M., Picaza-Gorrochategui, M., and Idoaga-Mondragon, N. (2020). Stress, anxiety, and depression levels in the initial stage of the COVID-19 outbreak in a population sample in the Northern Spain. *Cad. Saude Publica* 36:e00054020. doi: 10.1590/0102-311X00054020
- Patston, T. J., Kennedy, J., Jaeschke, W., Kapoor, H., Leonard, S. N., Cropley, D. H., et al. (2021). Secondary education in COVID lockdown: More anxious and less creative—Maybe Not? *Front. Psychol.* 12:613055. doi: 10.3389/fpsyg.2021.613055
- 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. *Ann. Med. Psychol.* 168, 97–106. doi: 10.1016/j.amp.2009.09.003
- Roma, P., Monaro, M., Colasanti, M., Ricci, E., Biondi, S., Di Domenico, A., et al. (2020). A 2-Month follow-up study of psychological distress among Italian people during the COVID-19 lockdown. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17:8180. doi: 10.3390/ijerph17218180
- Runco, M. A., and Beghetto, R. A. (2019). Primary and secondary creativity. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27, 7–10. doi: 10.1016/j.cobeha.2018.08.011
- Runco, M. A., Walczyk, J. J., Acar, S., Cowger, E. L., Simundson, M., and Tripp, S. (2014). The Incremental validity of a short form of the ideational behavior scale and usefulness of distractor, contraindicative, and lie scales. *J. Creat. Behav.* 48, 185–197. doi: 10.1002/jocb.47
- Tang, C., Ma, H., Naumann, S. E., and Xing, Z. (2020). Perceived Work Uncertainty and Creativity During the COVID-19 pandemic: the roles of zhongyong and creative self-efficacy. *Front. Psychol.* 11:596232. doi: 10.3389/fpsyg.2020.596232
- Vartanian, O., Wertz, C. J., Flores, R. A., Beatty, E. L., Smith, I., Blackler, K., et al. (2018). Structural correlates of openness and intellect: implications for the contribution of personality to creativity. *Hum. Brain Mapp.* 39, 2987–2996. doi: 10.1002/hbm.24054
- Wu, X., Guo, T., Tan, T., Zhang, W., Qin, S., Fan, J., and Luo, J. (2019). Superior emotional regulating effects of creative cognitive reappraisal. *Neuroimage* 200, 540–551. doi: 10.1016/j.neuroimage.2019.06.061
- Zabelina, D., Clay, J., and Upshaw, J. (2021). Imagination, anxiety, and loneliness during the COVID-19 pandemic. *PsyArXiv* [Preprint]. doi: 10.31234/osf.io/9aqbj

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.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Copyright © 2022 Lopez-Persem, Bieth, Guiet, Ovando-Tellez and Volle. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.



Théophile Bieth, Alizée Lopez-Persem,
Marcela Ovando-Tellez, Marika Urbanski,
and Emmanuelle Volle

20.1 Introduction

The development of high-level cognitive functions in humans allows us to plan for future long-term goals, to adapt quickly to a changing environment, to innovate, and to create artwork. Among these functions, creativity is a cornerstone to our ability to cope with change and solve novel problems. Creativity is at the heart of many domains of human activity, including arts, sciences, education, or economy, and leads to innovation and discoveries. However, creative thinking is not restricted to extraordinary achievements or specific domains of expression (e.g. art). Finding original solutions to problems, achieving something novel, thinking away from pre-established ideas, and even coping with negative emotions [1, 2] are all creative requirements that also take place in everyday life. All human activities can involve creative thinking, as soon as we have to produce something new (e.g. an idea, a product, or a solution) to appropriately face situations with no established solution. Besides, in addition to the value of what we produce, creativity is also essential for well-being, as more creative people appear to be happier and more satisfied with their lives [3, 4]. Despite the importance of creativity in everyday life and society, the consequences of brain diseases on creative abilities are poorly known. As difficulties in creative thinking or creative problem-solving are not classically assessed in clinical practice, their impact on the daily life of patients with various brain diseases or damage is not understood [5–8].

T. Bieth

Sorbonne University, Paris Brain Institute (ICM), INSERM, CNRS, Paris, France

Neurology Department, Pitié-Salpêtrière Hospital, AP-HP, Paris, France

A. Lopez-Persem · M. Ovando-Tellez · E. Volle (✉)

Sorbonne University, Paris Brain Institute (ICM), INSERM, CNRS, Paris, France

M. Urbanski

Neurology Department, CHU Poitiers, Poitiers, France

To date, only a few studies have explored creativity in patients. Converging evidence indicates that damage to several brain regions or networks impact creative thinking, suggesting that patients with brain lesions requiring surgery may also have their creative abilities impaired. To our knowledge, creative abilities are not currently assessed as part of the perioperative planning of brain surgery, and no published study examined creative abilities intraoperatively (but see [9]). Unique case reports described intraoperative testing of particular artistic skills (mostly musical) that were critical for the patient (for instance, playing the violin, the flute, or the guitar; see [10–13]) but did not specifically assess creative abilities.

In this chapter, we first present some bases of creative cognition. Second, we review the recent neuroimaging literature in healthy subjects that revealed a set of brain regions involved in creativity tasks or related to creative abilities, and how they are organised into structured brain networks. Third, we present the few patient studies that explored the consequences of brain lesions on creative abilities. Although these studies were not conducted in neurosurgical patients specifically, they allow some predictions about the lesion locations at risk of long-term deficits. The improved knowledge of the creativity brain networks may hence be useful for planning and monitoring brain surgery in slow-growing lesions like glioma or malformations. However, as we discuss in the last part, the precise brain areas which integrity is necessary to preserve creative thinking and improve functional or mental outcomes of patients remain to be examined in neurosurgical patients specifically. As creativity has not been empirically tested in patients undergoing awake surgery, intraoperative mapping is unknown. Designing creativity tasks complying with the constraints of intraoperative mapping appears quite challenging. We finally suggest some avenues for future research and discuss how creativity tasks could be adapted for this purpose.

20.2 Creative Cognition

Creativity is usually defined as the ability to produce a work that is both original (unusual, novel, unexpected) and appropriate (useful, adaptive, valuable). From a neuroscience perspective, this capacity results from a set of mental operations that are normally found in all humans and can be studied experimentally. Several frameworks have been developed to explore creative abilities and the underlying cognitive and brain mechanisms: divergent thinking (DT), insight problem-solving, and associative combination.

The DT approach relies on the hypothesis that creativity depends on the ability to generate multiple solutions to an open-ended problem that does not have a right or wrong answer, and to search in different directions [14]. In completing DT tasks, participants should explore various options, think remotely, and generate unusual ideas. For instance, a typical DT task is the Alternate Uses Task (AUT, Fig. 20.1). The psychometric approach of DT provides a procedure for scoring creativity.

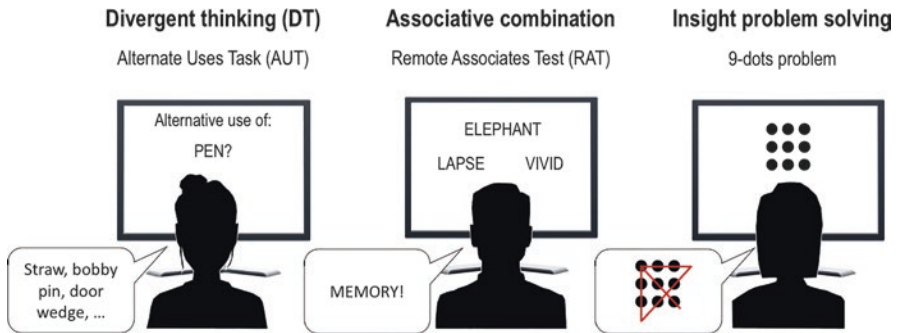


Fig. 20.1 Schematic representation of three main tasks used to assess creative abilities. The Alternate Uses Task (AUT) consists of asking participants to provide as many alternative and original uses as possible that one can make with a familiar object, such as a pen, with a time limit. The Remote Associates Test (RAT) consists, from three proposed words which have no apparent link between them (for example, “elephant”, “lapse”, and “vivid”), of finding a fourth word which is related to each of these words (in the previous example, “memory”). In the “9-dots problem” all nine points must be joined with only four continuous line segments

Typically, DT tasks responses are scored for fluency (quantity of relevant productions) and originality (quality of the productions in terms of originality, estimated either by a subjective consensual assessment or statistically by measuring the rarity of each response), as well as flexibility (number of different categories of productions), and elaboration (the degree of enrichment of productions).

A second approach, supported by Mednick [15], relies on the idea that creativity is the ability to connect things in new ways. It emphasises the role of semantic associations in creativity. Mednick defined creativity as the forming of associative elements into new combinations, which meet specified requirements. The more mutually remote the elements of the new combination, the more creative the process. The classical experimental task of this approach is the Remote Associates Test (RAT, Fig. 20.1).

The third approach to explore creativity is insight problem-solving. Insight problems can be visual, verbal, or mathematical. In insight problems, the solution can typically be found with the phenomenon of “Aha!” or “Eurêka”. The “Eurêka” describes a subjective experience that arises when the solution to a given problem comes to mind suddenly, without being able to report the mental steps leading to this solution (as opposed to analytic solving). A feeling of pleasure and confidence often accompanies it. Insight problems usually include in their statements implicit constraints that one needs to overcome to find the solution. Hence, solving an insight problem implies a reorganisation of the problem representation. For example, in the visuospatial “nine-dots problem” (see [16], Fig. 20.1), the test-takers tend to stay inside a virtual square delimited by the dots, while the solution can only be found by drawing lines beyond the limits of the square. The RAT (described above) is, in fact, a particular type of verbal insight problem and is probably the most frequently

used task to study insight problem-solving processes. Insight problems and RAT are usually viewed as convergent thinking tasks, where idea generation should converge to one correct solution.

In the cognitive neuroscience of creativity, the use of these approaches provides broad evidence in favour of the involvement of cognitive control functions that depend on the prefrontal cortex (PFC). Cognitive control functions that are important for creative abilities include inhibition (of inappropriate ideas or obvious non-creative ideas), working memory and attentional control (allowing to form and manipulate mental representations), response selection, and controlled retrieval in memory (to orient the search in memory) [17–22].

Besides deliberate cognitive control, creative cognition also involves another type of processes called associative processes [15]. Associative processes allow to spontaneously activate associated knowledge in memory [23, 24]. Psychological studies have shown that more creative people have more flexible semantic associations (i.e. related elements in their semantic memory), allowing them to connect more distant concepts or words. Researchers in the field now consider that creative abilities or performance result from an interaction, or a balance, between associative and controlled processes [18, 25]. Associative processes allow to spontaneously activate associations of ideas depending on the organisation of these associations in memory. Controlled processes allow controlling the way ideas are generated using a set of cognitive control functions. How these processes interact remains an open question.

In addition to this spontaneous versus controlled distinction, theories on creativity separate generative processes and evaluative processes of creative thinking [26]. Once a candidate idea is generated, it is evaluated for its originality and appropriateness before being selected (or rejected).

20.3 Brain Correlates of Creativity in Healthy Subjects

The cognitive frameworks mentioned above have been used to study the cerebral bases of creativity in neuroimaging, in particular in recent years in functional MRI. Consistent with the involvement of cognitive control processes in creative cognition, the PFC is one of the regions the most consistently associated with creativity tasks in functional imaging. Yet, different parts of the PFC have been reported, and the role of each subregion is still debated. Multiple other brain regions are also involved, in particular, parietal and temporal areas [27]. Recent research suggests that creativity involves interactions of large-scale brain systems—networks—rather than isolated brain regions [28]. With the development of network neuroscience based on functional connectivity, the neuroimaging of creative cognition in healthy subjects have started to clarify the multiple brain systems involved in creative processes. The main identified networks, i.e. sets of regions functionally interconnected, are the Default Mode Network (DMN), the Executive Control Network (ECN), and the Salience Network (SN) (Fig. 20.2).

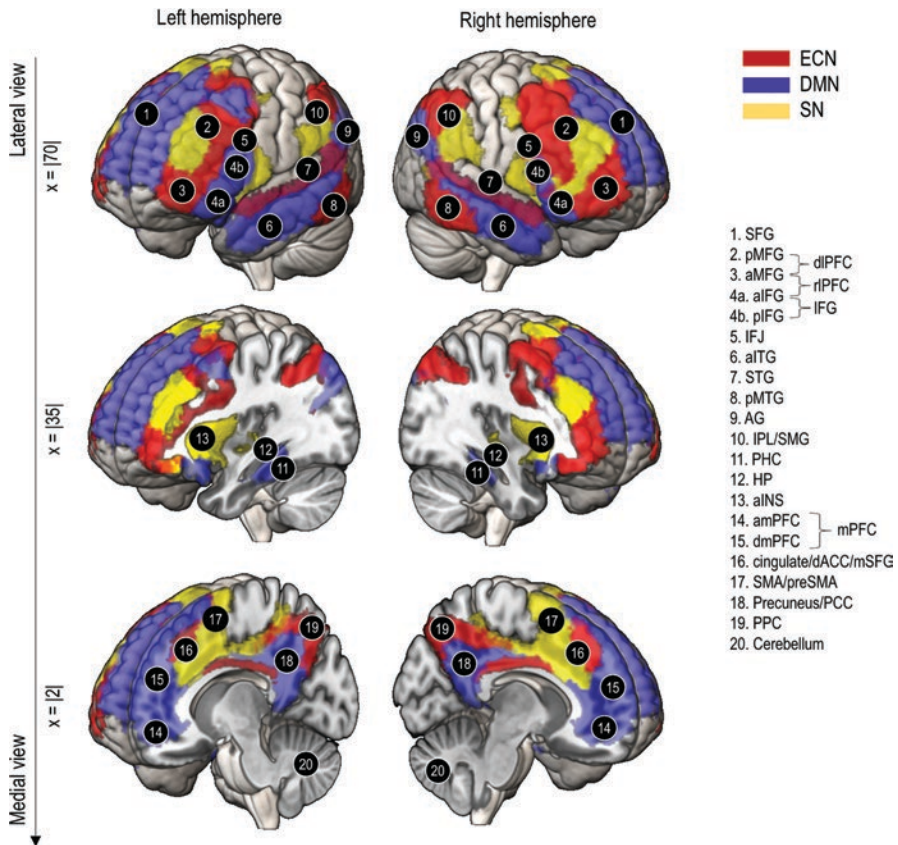


Fig. 20.2 Brain areas involved in creativity. Schematic representation of the main long-range brain networks and the main regions associated with creativity in neuroimaging studies are overlaid on a brain rendering. Brain networks are extracted from Yeo et al. [33]. *SFG* Superior frontal gyrus, *pMFG* posterior middle frontal gyrus, *aMFG* anterior middle frontal gyrus, *dIPFC* dorso-lateral prefrontal cortex, *aIFG* anterior inferior frontal gyrus, *rIPFC* rostrolateral frontal gyrus, *pIFG* posterior frontal gyrus, *IFG* inferior frontal gyrus, *IFJ* inferior frontal junction, *aITG* anterior inferior temporal gyrus, *STG* superior temporal gyrus, *pMTG* posterior middle temporal gyrus, *AG* angular gyrus, *IPL* Inferior parietal lobule, *PHC* parahippocampal cortex, *HP* hippocampus, *aINS* anterior insula, *amPFC* anterior medial prefrontal cortex, *dmPFC* dorsomedial prefrontal cortex, *mPFC* medial prefrontal cortex, *dACC* dorsal anterior cingulate cortex, *mSFG* medial part of the SFG, *SMA* supplementary motor area, *PCC* posterior cingulate cortex, *PPC* posterior parietal cortex

20.3.1 Brain Networks Involved in Creativity

The DMN typically consists of three components: a core system, composed of the anterior medial PFC and the precuneus; a medial temporal subsystem, that comprises the ventromedial PFC, the hippocampus, and the parahippocampal cortex; and a dorsomedial subsystem, including the middle temporal gyrus, angular gyrus, and the dorsomedial PFC [29]. Regions of the core system appear to qualify as

functional hubs interacting with the two subsystems. The DMN has been shown to support processes of self-generated thought and spontaneous cognition, but its role remains to be fully understood [30]. During creativity tasks, the DMN is assumed to process spontaneous idea generation, through unconstrained associative thinking [31]. The ECN is mainly composed of the dorsolateral PFC, especially its rostral and posterior parts, the dorsal anterior cingulate cortex, the superior parietal cortex, the dorsal part of the inferior parietal lobule, and the posterior part of the temporal lobe including the temporoparietal junction [32, 33]. It is classically associated with controlled processes such as working memory, inhibition, attentional control, memory retrieval, planning, and flexibility.

In cognitive neuroscience, the ECN and DMN are usually considered as having opposing activity patterns, as the former tend to be involved during active demanding tasks and the latter during rest or mind-wandering [30]. However, analyses of functional connectivity between those networks have shown that they interact during creativity tasks [28]. Based on those findings, Beaty et al. [28] have proposed that the two networks cooperate to balance associative and controlled processes for the generation and evaluation of ideas and that the SN network might mediate this cooperation. The central regions of SN are the bilateral anterior insula and dorsal anterior cingulate cortex; it also includes several subcortical and limbic structures, and possibly prefrontal/premotor areas. This network has been associated with attentional switching, detection of salient external or internal stimuli (especially via its insular node), and conflict monitoring (especially via its cingulate node). It may allow switching between associative processes (allowing idea generation) supported by the DMN and controlled processes (participating in idea evaluation and selection) supported by the ECN, according to the goal of the creativity task [34–36].

Recent functional connectivity studies also demonstrated that the way brain regions are connected within and between the DMN and ECN is predictive of individuals' creativity [37], assessed by DT tasks. Hence, functional connectivity patterns are a brain measurement highly relevant to investigation of the neural bases of creativity and should be taken into account.

20.3.2 The Specificity of Regions for Creativity Domains and Processes

Functional interactions between the DMN and ECN regions have typically been observed in verbal DT tasks, but also in various artistic performances, such as musical improvisation, poetry, visual art, and literature [28, 38]. Previous meta-analyses of neuroimaging studies on creativity also highlighted particular regions within the DMN, SN, or ECN that were associated with distinct creativity domains or tasks while others were more general, suggesting that both domain-general and domain-specific or task-specific regions co-exist within creativity networks [27, 39]. Both meta-analyses reported several regions that were recruited by different tasks and creativity domains across studies, including regions within the lateral PFC, medial PFC, and posterior parietal cortex, in particular in the left inferior frontal gyrus,

inferior frontal junction, and left angular gyrus [27]. Boccia et al. [39] compared the brain correlates of musical, verbal, and visuospatial creativity and found that all three domains involved the dorsolateral PFC. As the dorsolateral PFC plays a role in mental effort, focused attention, working memory, and selection processes, this finding is consistent with its contribution to domain-general control processes for creativity. When examining creativity domains separately, the left inferior and middle frontal gyri were consistently involved in verbal creativity, together with the posterior part of the left temporal cortex [27], the left middle and superior temporal gyri, inferior parietal lobule, post-central and supramarginal gyri, right lingual gyrus, anterior insula, and cerebellum [39]. In the visuospatial domain, the typical brain regions observed in neuroimaging studies are the right inferior and middle frontal gyri, bilateral thalamus, and left precentral gyrus. In musical creativity, the most common regions that have been observed are the bilateral medial PFC (including premotor areas) and cingulate gyrus, the left middle frontal gyrus, left inferior parietal lobule, right fusiform gyrus, and cerebellum [39]. Additionally, the pre-supplementary motor area and dorsal premotor cortex seem to play a role in creativity [28, 40].

Gonen-Yaacovi et al. [27] also reported process-oriented regions. In this study, rostral regions of the lateral PFC were specialised for idea combination, and posterior prefrontal regions for idea generation. Idea combination recruited the left anterior inferior frontal gyrus (BA10/47 and 46) and left posterior middle temporal gyrus (BA 37/21) together with the right inferior frontal gyri (BA 44/45), while idea generation recruited the left dorsolateral PFC (BA 45/46), left supramarginal gyrus (BA 40), and anteromedial PFC (BA 10) (see also [41]). Overall, these studies indicate that process-general and process-specific regions co-exist. However, the role of each subregion in the creativity networks, and the way their functional connectivity is reconfigured according to the task demand or domain, is not yet fully understood.

20.3.3 Hemispheric Lateralisation

The previous meta-analyses of functional imaging have described bilateral but predominantly left brain activation during creativity tasks [27, 41], especially for verbal tasks [39]. Whether left dominance is related to the verbal domain of the creativity tasks that were used in the included studies remains an open question. Hemispheric lateralisation in creativity is a debated topic. First, it is important to keep in mind that both hemispheres are involved during creativity tasks. Yet, some studies have found some domain-dependent dissociations. For instance, Chen et al. [42] found that participants with high visuospatial creativity had stronger segregation of functional connectivity within some SN and DMN regions of the right hemisphere, while participants with high verbal creativity exhibited a balanced inter-hemispheric functional connectivity, suggesting that both hemispheres are involved in the verbal domain, with no particular dominance. Thus, even though language processes are more likely to recruit regions in the left hemisphere, both hemispheres are engaged and exchange information during verbal creativity.

Hence, functional imaging studies have shown that creative cognition is supported by a large set of brain areas that are organised in interacting networks. The data discussed above are mainly correlational and thus do not inform us about the brain regions and networks that are necessary for creativity. Brain lesion studies can help to elucidate how creative abilities are affected in patients and to identify the regions or networks which integrity is critical for creativity (Fig. 20.2).

20.4 Creativity in Brain-Damaged Patients

Only a few lesion studies measuring creativity have been conducted (Fig. 20.3), and they mostly used a group approach comparing patients with different lesion locations at the regional level, but not at the network or node level. Hence, the conclusions that can be drawn regarding the systems or networks that are critical are mostly indirect, and regional precision in delineating the critical areas is often limited.

Nevertheless, one study by Bendetowicz et al. [43] used a voxel-based lesion-symptom approach, and directly tested the impact of lesions at the network level. Although this study only examined frontal lesions, the authors revealed critical prefrontal nodes within the DMN and the ECN for different processes of verbal creativity. First, damage to either DMN or left ECN impacted performance on the RAT. Second, damage to specific nodes and anatomical connections affected distinct creativity processes. On the one hand, damage to the right rostromedial PFC, within the DMN, led to a decreased creative performance on the RAT along with difficulties in generating spontaneous and remote semantic associations. The difficulties in generating remote ideas were associated with a disconnection affecting the right cingulate fasciculus. Remote thinking difficulties of these patients with DMN damage were interpreted as a lack of flexibility in semantic associations, which impacted the ability to find the remote solution on the RAT [15].

On the other hand, patients with damage to the left rostrolateral PFC, in the left ECN, or to several tracts connected to it (frontomarginal tract, anterior thalamic radiations, and frontostriatal projections), were impaired on the same creativity task (the RAT), but had preserved flexibility in semantic associations and remote thinking. Impaired creativity in these patients is thus likely due to difficulties in the combination step that integrates the generated associates to produce the solution. Overall, consistent with results from functional imaging studies in healthy subjects, the DMN and the left ECN, involving distinct areas of the PFC, were found critical for creative abilities. Low creative performance could be explained by rigidity in semantic associations in patients with a rostromedial PFC lesion and by difficulties in more controlled combination processes in patients with a left rostrolateral PFC lesion.

Other lesions studies also suggest that damage to regions of the DMN, ECN, or SN impacts creative abilities. The assessment of creativity in patients with focal brain damage to supposedly DMN-related regions is sparse. Shamay-Tsoory et al.

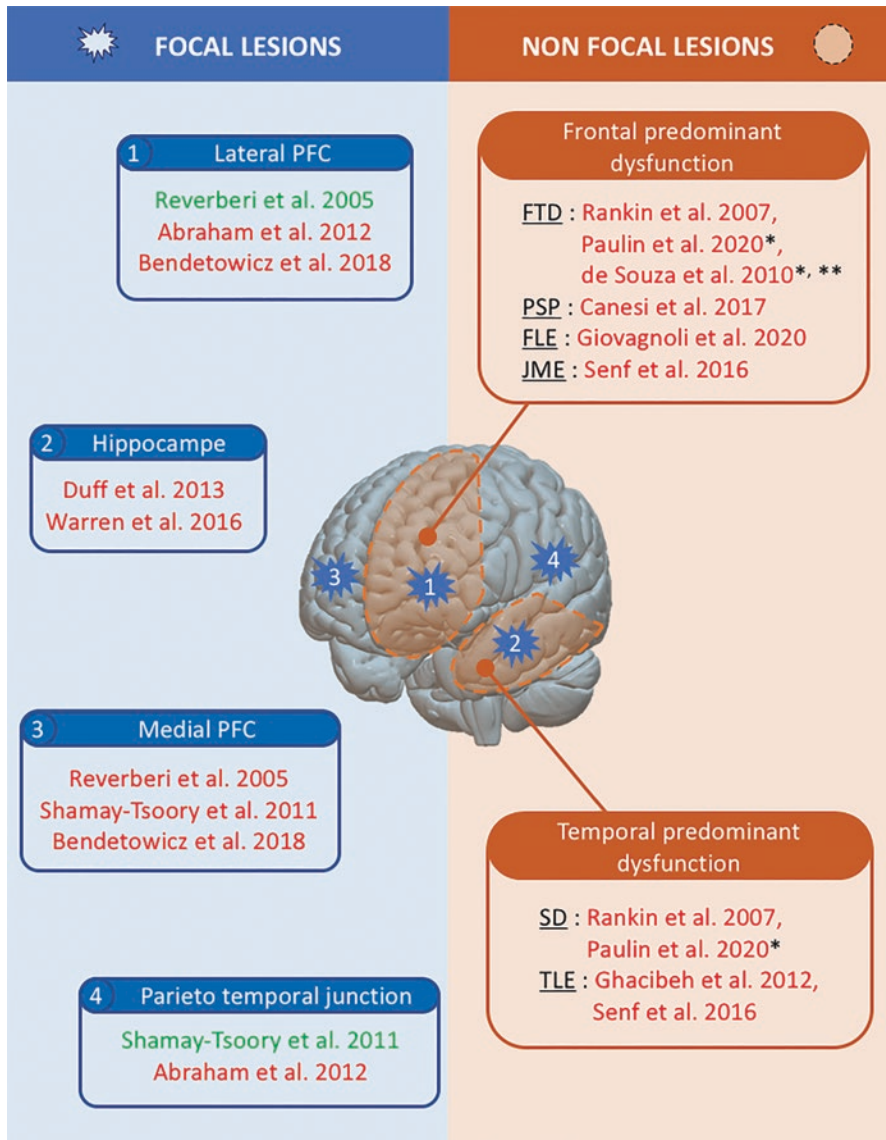


Fig. 20.3 Summary of studies in patients on creative cognition in adults. The figure includes patient studies that related creative abilities to focal anatomical lesions identified by neuroimaging methods (in blue, left side) and to more diffuse lesions based on disease-related brain dysfunctions (in orange, right side). References written in red indicate studies reporting creativity impairment related to lesion location. References written in green indicate studies reporting creativity enhancement related to lesion location. *: Indicates studies in patients suffering from a neurological illness which also used a neuroimaging approach. **: This study reports neuroimaging correlates of divergent thinking in parietal, temporal, and parieto-temporal regions in FTD patients. *PFC* Prefrontal cortex, *FTD* Frontotemporal dementia, *PSP* Progressive supranuclear palsy, *FLE* Frontal lobe epilepsy, *SD* Semantic dementia, *TLE* Temporal lobe epilepsy, *JME* Juvenile myoclonic epilepsy

[44] measured DT abilities in groups of patients with focal brain damage in the inferior frontal gyrus or the rostromedial PFC. The authors reported that patients with damage to the rostromedial PFC had difficulties in generating original ideas in DT tasks. Moreover, the larger the lesion in the right medial PFC was, the higher the impairment in creativity tasks. This result is consistent with Bendetowicz et al. [43]. However, another lesion study by Abraham et al. [45] did not observe creativity deficits after rostral prefrontal lesions, maybe due to differences in the nature and location of the lesions, and statistical approaches. Other studies focused on the hippocampus reported that patients with bilateral hippocampal damage had impairment in both DT task [46] and RAT [47]. Hippocampus is thought to participate in a subnetwork of the DMN [29, 48]. These findings suggest that, as for the rostromedial PFC, damage to the hippocampus impairs creative processes that are crucial for different tasks, presumably affecting associative thinking. These results are in line with a recent study in patients with semantic dementia with predominant bilateral atrophy in the anterior temporal lobe [49]. In this study, the patients had impaired performance on the DT task, and a voxel-based morphometry analysis revealed an association between grey matter volume in the left medial temporal lobe, centred on the left anterior hippocampus, and the DT scores. Overall, the few studies that have been performed in patients suggest that several DMN regions are critical to creativity tasks.

A few patient studies also highlight the critical role of supposedly ECN or SN regions. Several studies in patients with neurodegenerative diseases with predominantly frontal dysfunction support the importance of frontal control functions in creativity. Previous group studies reported impaired DT in neurodegenerative patients including behavioural variant of frontotemporal dementia (FTD), semantic dementia, or progressive supranuclear palsy [49–53]. De Souza et al. [51] first revealed that creativity scores correlated with a hypoperfusion in rostral prefrontal, lateral temporal and parietal regions in FTD patients, regions that may overlap with the ECN. In FTD and semantic dementia patients, Paulin et al. [49] recently found an association between grey matter atrophy in the left middle frontal gyrus and DT performance.

Creativity in other neurological diseases such as epilepsy has also been explored. A few studies indicated impaired creativity in epileptic patients with a frontal or a temporal lobe dysfunction [54, 55]. Some differences between frontal and temporal epilepsy have been reported, suggesting that temporal dysfunction affects predominantly verbal creativity [54, 55] while frontal lobe epilepsy mostly affects visuospatial creativity. No left-right difference in temporal lobe epilepsy patients regarding verbal creativity was observed [56]. Overall, these studies also support the hypothesis that both temporal and frontal lobes are critical for creativity. However, the studies mentioned above in neurodegenerative diseases and epilepsy do not allow definitive conclusions regarding which network is crucial.

Lesion studies of patients with more focal lesions affecting prefrontal and parietal regions that may belong to the ECN are scarce. Abraham et al. [45] showed that damage to frontolateral or temporoparietal regions affects several creativity tasks, including DT tasks. Conversely, it is interesting to note that a few lesion studies

have suggested the possibility of a preserved or increased creative performance in patients with a left posterior parieto-temporal lesion or a lateral frontal lesion [44, 57]. Although these results remain to be replicated, they are consistent with a few brain stimulation studies (for a review see [58]). These findings may suggest that the organisation of the frontal and parietal regions for creativity is complex, with subregions possibly belonging to different functional systems, in turn playing distinct roles in creative cognition.

Overall, brain lesion studies converge with functional connectivity studies in healthy subjects and support the critical role of the DMN and ECN in different processes of creative thinking. Most studies highlight the critical role of the PFC either in its lateral or medial subregions. However, the PFC is a heterogeneous region with various connectivity patterns with the rest of the brain [59]. Understanding which network is impacted beyond the cortical lesion is thus essential to better understand the consequences of brain lesions on creativity [60].

20.5 Exploring Creativity in Patients Undergoing Brain Surgery

The patient studies presented above indicate that lesions affecting various brain areas in prefrontal, temporal, and parietal cortices impact creative thinking and problem-solving. These findings suggest that assessing creative abilities in patients suffering from neurological or neurosurgical diseases can be useful. However, problem-solving and creative abilities are not classically assessed in clinical practice.

Assessing creativity might be especially beneficial for patients with neurosurgical diseases such as gliomas or pharmaco-resistant epilepsy. Indeed, the brain regions or networks that were shown critical for creative thinking seem to overlap with some of the preferential locations of tumours or epileptogenic zones that require surgical intervention, e.g. frontoinsular, medial frontal, or temporal regions [61–63]. Hence, a proper assessment using creativity tasks before and after surgery would allow a more comprehensive understanding of the overall impact of the location of the lesion on cognition.

A few studies have assessed specific and personalised creativity-related skills, such as playing a musical instrument, before and during brain surgery [10–13], maximising the detection of a potential impact of a deficit on the patient's life. Nevertheless, when assessing the impact of the brain lesion or resection on the creative process, it is essential to distinguish the ability to think creatively as a domain-general process (tentatively captured by the creative tests described above) from specific creative domains or activities (for instance, playing music) that rely on domain-specific processes or skills. If brain lesions requiring brain surgery have an effect on creativity tests, affecting the patient's daily life, new tools to assess creativity during awake surgery may be developed. Similar approaches have been or are applied for more familiar cognitive functions such as language, unilateral spatial neglect, or executive functions and mentalizing [64–71].

Existing assessment tools of creative thinking and problem-solving could be adapted for clinical practice. The frameworks of DT and of insight problem-solving offer putative mechanisms and cognitive tasks that can be useful for this purpose, and the cerebral networks associated with these tasks have begun to be clarified [27, 28, 43]. Currently, several factors curb the assessment of creative processes during the perioperative planning of patients in clinical practice. Existing tools have not been yet normed and validated in clinical populations, and lack a pathological threshold. Besides, how impairment on creativity tasks relates to a detrimental change in functional outcomes, mental state, and quality of life remains to be measured, and may depend on the patient's profession, hobbies, or personality. As existing creativity assessments tap into nonspecific cognitive processes such as executive functions (inhibition, flexibility, working memory), semantic and episodic memory, functional consequences associated with poor creative abilities can be expected. However, the extent to which assessing creativity has an additional value will be important to examine. For instance, some DT tests were shown to discriminate dementia patients from control subjects more strongly than did classical fluency tests (category, phonemic; [72]). One can thus expect that creativity tasks are more complex and may be more sensitive to cognitive difficulties than more classical tests, and that they should reveal specific deficits that classical tests do not.

Regarding awake surgery, adding creativity tests to the toolbox of neurosurgeons for intraoperative monitoring may be worthy to be explored, especially if significant consequences are confirmed in their patients. There are strong constraints for intraoperative cognitive testing that may appear challenging regarding creativity tasks, including time constraints, repetition of many equivalent trials, and real-time evaluation of the patient responses as correct or not. Typical creativity tests usually do not satisfy these constraints, and adaptations are needed to make them suitable for functional intraoperative monitoring. For instance, the RAT or insight problem-solving tasks can be scored on a trial-by-trial basis, but response times are classically long (several seconds to several minutes). DT tasks have shorter response time, but determining the correctness of the response on a trial-by-trial basis is more difficult [73]. For DT tasks such as the AUT, automatic scoring methods have recently been developed and may allow an online scoring during surgery [74].

A task developed in our lab (Free Generation Associates Task; [43]) and others [75, 76] might offer an easier alternative. This task measures the ability to intentionally produce remote associations, with the instruction to think creatively. On each trial, a cue word is provided, and the participant is asked to generate a response word that is unusually associated with the cue word, with an original but existing link. The originality/singularity of responses at such task is positively correlated to the performance at creativity tests [75, 76], and depend on the integrity of the DMN, more especially the medial frontal pole [43] in brain-damaged patients.

In addition to the monitoring and planning of the surgery, the identification of deficits in creativity-related tasks can lead to proposing specific rehabilitation programs. Regarding creative abilities, cognitive training or stimulation programs have recently been developed and tested in healthy subjects [77–80]. Some studies suggest that engaging daily in creative activities is related to a better well-being and

flourishing in individuals [3]. In patients, approaches based on creative activities (for instance, using art therapy) have shown beneficial effects in some neurological or psychiatric diseases [81–83]. To our knowledge, no specific training of creative processes has been tested in patients, and this is an avenue for future research.

20.6 Conclusions

The growing interest of the scientific community for creative thinking and its neural bases have allowed significant advances in the field. Neuroscientific studies have identified creativity-related brain regions, interconnected within and between mainly three long-range networks, the DMN, ECN, and SN. Although scarce, patient studies indicate that lesions affecting these networks impact creativity. These existing studies suggest that assessing creativity in a clinical context might be beneficial. However, to which extent slowly developing brain lesions damaging these networks requiring surgery affect creative abilities, creative processes, and the patients' everyday life remains to be quantified. In turn, such patient studies will have a scientific impact by offering new insights on creative cognition and on the plasticity that allows this function to recover.

References

1. Mastria S, Agnoli S, Zanon M, Lubart T, Corazza GE. Creative brain, creative mind, creative person. In: Kapoula Z, Volle E, Renault J, Andreatta M, editors. Exploring transdisciplinarity in art and sciences. Heidelberg: Springer International Publishing; 2018. p. 3–29. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76054-4_1.
2. Wu X, Guo T, Tan T, Zhang W, Qin S, Fan J, Luo J. Superior emotional regulating effects of creative cognitive reappraisal. *Neuroimage*. 2019;200:540–51. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.06.061>.
3. Conner T, Deyoung C, Silvia P. Everyday creative activity as a path to flourishing. *J Posit Psychol*. 2016;13(2):181–9. <https://doi.org/10.1080/17439760.2016.1257049>.
4. Shen W, Hua M, Wang M, Yuan Y. The mental welfare effect of creativity: how does creativity make people happy? *Psychol Health Med*. 2020:1–8. <https://doi.org/10.1080/13548506.2020.1781910>.
5. Abraham A. The neuropsychology of creativity. *Curr Opin Behav Sci*. 2019;27:71–6. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.09.011>.
6. Ahmed FS, Miller LS. Adequate proverb interpretation is associated with performance on the independent living scales. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn*. 2015;22(3):376–87. <https://doi.org/10.1080/13825585.2014.952613>.
7. Bieth T, Ovando-Tellez M, Bernard M, Volle E. Contribution des études lésionnelles aux neurosciences de la créativité. *Ann Méd-Psychol Rev Psychiatr*. 2019;177(2):164–8.
8. Ovando-Tellez MP, Bieth T, Bernard M, Volle E. The contribution of the lesion approach to the neuroscience of creative cognition. *Curr Opin Behav Sci*. 2019;27:100–8. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.10.011>.
9. Gonen T, Shofty B, Perry D, Levi R, Mayselless N, Korn A, Glikman A, Shamay-Tsoory S, Hendler T, Ram Z. Mapping original thinking by differential modulation of large-scale cortical networks: functional preservation of creativity in LGG patients. *Brain Stimul Basic Transl Clin Res Neuromodul*. 2017;10(2):369. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.01.087>.

10. Piai V, Vos SH, Idelberger R, Gans P, Doorduyn J, Ter Laan M. Awake surgery for a violin player: monitoring motor and music performance, a case report. *Arch Clin Neuropsychol*. 2019;34(1):132–7. <https://doi.org/10.1093/arclin/acy009>.
11. Riva M, Casarotti A, Comi A, Pessina F, Bello L. Brain and music: an intraoperative stimulation mapping study of a professional opera singer. *World Neurosurg*. 2016;93:486.e13–8. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.06.130>.
12. Scerrati A, Labanti S, Lofrese G, Mongardi L, Cavallo MA, Ricciardi L, De Bonis P. Artists playing music while undergoing brain surgery: a look into the scientific evidence and the social media perspective. *Clin Neurol Neurosurg*. 2020a;196:105911. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2020.105911>.
13. Scerrati, A, Mongardi, L, Cavallo, MA, Labanti, S, Simioni, V, Ricciardi, L, De Bonis, P. Awake surgery for skills preservation during a sensory area tumor resection in a clarinet player. *Acta Neurol Belg*. 2020b;1-5. <https://doi.org/10.1007/s13760-020-01368-5>.
14. Guilford JP. Creativity. *Am Psychol*. 1950;5(9):444–54. <https://doi.org/10.1037/h0063487>.
15. Mednick SA. The associative basis of the creative process. *Psychol Rev*. 1962;69:220–32.
16. Patrick J, Ahmed A. Facilitating representation change in insight problems through training. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2014;40(2):532–43. <https://doi.org/10.1037/a0034304>.
17. Beaty RE, Christensen AP, Benedek M, Silvia PJ, Schacter DL. Creative constraints: brain activity and network dynamics underlying semantic interference during idea production. *NeuroImage*. 2017;148:189–96. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.01.012>.
18. Benedek M, Jauk E. Spontaneous and controlled processes in creative cognition. In: *The Oxford handbook of spontaneous thought*. 2018. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190464745.013.22>.
19. Cassotti M, Agogue M, Camarda A, Houdé O, Borst G. Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood: inhibitory control as a core process of creative problem solving. *New Dir Child Adolesc Dev*. 2016;2016(151):61–72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>.
20. De Dreu CKW, Nijstad BA, Baas M, Wolsink I, Roskes M. Working memory benefits creative insight, musical improvisation, and original ideation through maintained task-focused attention. *Personal Soc Psychol Bull*. 2012;38(5):656–69. <https://doi.org/10.1177/0146167211435795>.
21. Edl S, Benedek M, Papousek I, Weiss EM, Fink A. Creativity and the Stroop interference effect. *Personal Individ Differ*. 2014;69:38–42. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.05.009>.
22. Lee CS, Theriault DJ. The cognitive underpinnings of creative thought: a latent variable analysis exploring the roles of intelligence and working memory in three creative thinking processes. *Intelligence*. 2013;41(5):306–20. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.04.008>.
23. Benedek M, Kenett YN, Umdasch C. How semantic memory structure and intelligence contribute to creative thought: a network science approach. *Think Reason*. 2017;23(2):158–83.
24. Kenett YN, Anaki D, Faust M. Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:407. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00407>.
25. Volle E. Associative and controlled cognition in divergent thinking: theoretical, experimental, neuroimaging evidence, and new directions. In: Jung RE, Vartanian O, editors. *The Cambridge handbook of the neuroscience of creativity*. New York: Cambridge University Press; 2017.
26. Ellamil M, Dobson C, Beeman M, Christoff K. Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *NeuroImage*. 2012;59:1783–94. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.008>.
27. Gonen-Yaacovi G, de Souza LC, Levy R, Urbanski M, Josse G, Volle E. Rostral and caudal prefrontal contribution to creativity: a meta-analysis of functional imaging data. *Front Hum Neurosci*. 2013;7:465. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00465>.
28. Beaty RE, Benedek M, Silvia PJ, Schacter DL. Creative cognition and brain network dynamics. *Trends Cogn Sci*. 2016;20(2):87–95. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.10.004>.
29. Andrews-Hanna JR, Reidler JS, Sepulcre J, Poulin R, Buckner RL. Functional-anatomic fractionation of the brain’s default network. *Neuron*. 2010;65(4):550–62. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.02.005>.

30. Raichle ME. The restless brain: how intrinsic activity organizes brain function. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2015;370(1668):20140172. Article 1668. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0172>.
31. Marron TR, Lerner Y, Berant E, Kinreich S, Shapira-Lichter I, Hendler T, Faust M. Chain free association, creativity, and the default mode network. *Neuropsychologia.* 2018;118:40–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.018>.
32. Power JD, Petersen SE. Control-related systems in the human brain. *Curr Opin Neurobiol.* 2013;23(2):223–8. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.12.009>.
33. Yeo BTT, Krienen FM, Sepulcre J, Sabuncu MR, Lashkari D, Hollinshead M, Roffman JL, Smoller JW, Zöllei L, Polimeni JR, Fischl B, Liu H, Buckner RL. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol.* 2011;106(3):1125–65. <https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>.
34. Adnan A, Beaty R, Silvia P, Spreng RN, Turner GR. Creative aging: functional brain networks associated with divergent thinking in older and younger adults. *Neurobiol Aging.* 2019;75:150–8. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2018.11.004>.
35. Jilka SR, Scott G, Ham T, Pickering A, Bonnelle V, Braga RM, Leech R, Sharp DJ. Damage to the salience network and interactions with the default mode network. *J Neurosci.* 2014;34(33):10798–807. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0518-14.2014>.
36. Sridharan D, Levitin DJ, Menon V. A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proc Natl Acad Sci.* 2008;105(34):12569–74. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800005105>.
37. Beaty RE, Kenett YN, Christensen AP, Rosenberg MD, Benedek M, Chen Q, Fink A, Qiu J, Kwapil TR, Kane MJ, Silvia PJ. Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2018;115(5):1087–92. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713532115>.
38. Zhu W, Chen Q, Xia L, Beaty RE, Yang W, Tian F, Sun J, Cao G, Zhang Q, Chen X, Qiu J. Common and distinct brain networks underlying verbal and visual creativity: brain networks underlying verbal and visual creativity. *Hum Brain Mapp.* 2017;38(4):2094–111. <https://doi.org/10.1002/hbm.23507>.
39. Boccia M, Piccardi L, Palermo L, Nori R, Palmiero M. Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity. *Front Psychol.* 2015;6:1195. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01195>.
40. Matheson HE, Kenett YN. The role of the motor system in generating creative thoughts. *NeuroImage.* 2020;213:116697. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116697>.
41. Cogdell-Brooke LS, Sowden PT, Violante IR, Thompson HE. A meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies of divergent thinking using activation likelihood estimation. *Hum Brain Mapp.* 2020;41(17):5057–77. <https://doi.org/10.1002/hbm.25170>.
42. Chen Q, Beaty RE, Cui Z, Sun J, He H, Zhuang K, Ren Z, Liu G, Qiu J. Brain hemispheric involvement in visuospatial and verbal divergent thinking. *Neuroimage.* 2019;202:116065. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116065>.
43. Bendetowicz D, Urbanski M, Garcin B, Foulon C, Levy R, Bréchemier M-L, Rosso C, Thiebaut de Schotten M, Volle E. Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain.* 2018;141(1):217–33. <https://doi.org/10.1093/brain/awx294>.
44. Shamay-Tsoory SG, Adler N, Aharon-Peretz J, Perry D, Mayseless N. The origins of originality: the neural bases of creative thinking and originality. *Neuropsychologia.* 2011;49(2):178–85. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.020>.
45. Abraham A, Beudt S, Ott DVM, Yves von Cramon D. Creative cognition and the brain: dissociations between frontal, parietal–temporal and basal ganglia groups. *Brain Res.* 2012;1482:55–70. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.09.007>.
46. Duff MC, Kurczek J, Rubin R, Cohen NJ, Tranel D. Hippocampal amnesia disrupts creative thinking: creative thinking and the Hippocampus. *Hippocampus.* 2013;23(12):1143–9. <https://doi.org/10.1002/hipo.22208>.
47. Warren DE, Kurczek J, Duff MC. What relates newspaper, definite, and clothing? An article describing deficits in convergent problem solving and creativity following hippocampal

- damage: hippocampal damage impairs convergent problem solving. *Hippocampus*. 2016;26(7):835–40. <https://doi.org/10.1002/hipo.22591>.
48. Alves PN, Foulon C, Karolis V, Bzdok D, Margulies DS, Volle E, Thiebaut de Schotten M. An improved neuroanatomical model of the default-mode network reconciles previous neuroimaging and neuropathological findings. *Commun Biol*. 2019;2:370. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0611-3>.
 49. Paulin T, Roquet D, Kenett YN, Savage G, Irish M. The effect of semantic memory degeneration on creative thinking: a voxel-based morphometry analysis. *NeuroImage*. 2020;220:117073. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117073>.
 50. Canesi M, Rusconi ML, Cereda E, Ranghetti A, Cereda V, Moroni F, Pezzoli G. Divergent thinking in parkinsonism: a case–control study. *Front Neurol*. 2017;8:534. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00534>.
 51. de Souza LC, Volle E, Bertoux M, Czernecki V, Funkiewiez A, Allali G, Leroy B, Sarazin M, Habert M-O, Dubois B, Kas A, Levy R. Poor creativity in frontotemporal dementia: a window into the neural bases of the creative mind. *Neuropsychologia*. 2010;48(13):3733–42. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.010>.
 52. Rankin KP, Liu AA, Howard S, Slama H, Hou CE, Shuster K, Miller BL. A case-controlled study of altered visual art production in Alzheimer’s and FTLD. *Cogn Behav Neurol*. 2007;20(1):48–61. <https://doi.org/10.1097/WNN.0b013e31803141dd>.
 53. Ruggiero F, Cortese F, Lavazza A, D’Urso G, Nuzzo CD, Marceglia S, Pravettoni G, Priori A, Ferrucci R. Do neurodegenerative diseases affect creativity? Divergent thinking in frontotemporal dementia and Parkinson’s disease. *Creat Res J*. 2019;31(1):102–9. <https://doi.org/10.1080/10400419.2019.1577667>.
 54. Giovagnoli AR. The contribution of the frontal lobe to creativity. Insights from epilepsy. *Epilepsy Behav*. 2020;111:107313. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2020.107313>.
 55. Senf P, Scheuren L, Holtkamp M. Is there a creative functional paradoxical facilitation in juvenile myoclonic epilepsy? *Epilepsy Behav*. 2016;62:285–90. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.07.023>.
 56. Ghacibeh GA, Heilman KM. Creative innovation with temporal lobe epilepsy and lobectomy. *J Neurol Sci*. 2013;324(1–2):45–8. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2012.09.029>.
 57. Reverberi C, Toraldo A, D’Agostini S, Skrap M. Better without (lateral) frontal cortex? Insight problems solved by frontal patients. *Brain*. 2005;128(12):2882–90. <https://doi.org/10.1093/brain/awh577>.
 58. Weinberger AB, Green AE, Chryssikou EG. Using transcranial direct current stimulation to enhance creative cognition: interactions between task, polarity, and stimulation site. *Front Hum Neurosci*. 2017;11:246. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00246>.
 59. Thiebaut de Schotten M, Urbanski M, Batrancourt B, Levy R, Dubois B, Cerliani L, Volle E. Rostro-caudal architecture of the frontal lobes in humans. *Cereb Cortex*. 2017;27(8):4033–47.
 60. Foulon C, Cerliani L, Kinkingnéhun S, Levy R, Rosso C, Urbanski M, Volle E, Thiebaut de Schotten M. Advanced lesion symptom mapping analyses and implementation as BCBtoolkit. *GigaScience*. 2018;7(3). Article 3. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy004>.
 61. Duffau H, Capelle L. Preferential brain locations of low-grade gliomas: comparison with glioblastomas and review of hypothesis. *Cancer*. 2004;100(12):2622–6. <https://doi.org/10.1002/cncr.20297>.
 62. Mithani K, Boutet A, Germann J, Elias GJB, Weil AG, Shah A, Guillen M, Bernal B, Achua JK, Ragheb J, Donner E, Lozano AM, Widjaja E, Ibrahim GM. Lesion network localization of seizure freedom following MR-guided laser interstitial thermal ablation. *Sci Rep*. 2019;9(1):18598. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55015-y>.
 63. Parisot S, Darlix A, Baumann C, Zouaoui S, Yordanova Y, Blonski M, Rigau V, Chemouny S, Taillandier L, Bauchet L, Duffau H, Paragios N. A probabilistic atlas of diffuse WHO Grade II glioma locations in the brain. *PLoS One*. 2016;11(1):e0144200. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144200>.
 64. Duffau H. Awake surgery for nonlanguage mapping. *Neurosurgery*. 2010;66:523–8.

65. Duffau H. Functional mapping before and after low-grade glioma surgery: a new way to decipher various spatiotemporal patterns of individual neuroplastic potential in brain tumor patients. *Cancers*. 2020;12(9):2611. Article 9. <https://doi.org/10.3390/cancers12092611>.
66. Mandonnet E, Cerliani L, Siuda-Krzywicka K, Poisson I, Zhi N, Volle E, Thiebaut de Schotten M. A network-level approach of cognitive flexibility impairment after surgery of a right temporo-parietal glioma. *Neurochirurgie*. 2017;63(4):308–13. <https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2017.03.003>.
67. Mandonnet E, Vincent M, Valero-Cabr e A, Facque V, Barberis M, Bonnetblanc F, Rheault F, Volle E, Descoteaux M, Margulies DS. Network-level causal analysis of set-shifting during trail making test part B: a multimodal analysis of a glioma surgery case. *Cortex*. 2020;132:238–49. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.08.021>.
68. Puglisi G, Sciortino T, Rossi M, Leonetti A, Fornia L, Conti Nibali M, Casarotti A, Pessina F, Riva M, Cerri G, Bello L. Preserving executive functions in nondominant frontal lobe glioma surgery: an intraoperative tool. *J Neurosurg*. 2018;131(2):474–80. <https://doi.org/10.3171/2018.4.JNS18393>.
69. Thiebaut de Schotten M, Urbanski M, Duffau H, Volle E, Levy R, Dubois B, Bartolomeo P. Direct evidence for a parietal-frontal pathway subserving spatial awareness in humans. *Science*. 2005;309(5744):2226–8. <https://doi.org/10.1126/science.1116251>.
70. Wager M, Du Boisgueheneuc F, Pluchon C, Bouyer C, Stal V, Bataille B, Guillevin CM, Gil R. Intraoperative monitoring of an aspect of executive functions: administration of the Stroop test in nine adult patients during awake surgery for resection of frontal glioma. *Neurosurgery*. 2013;72:ons169–80. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e31827bf1d6>.
71. Yordanova YN, Cochereau J, Duffau H, Herbet G. Combining resting state functional MRI with intraoperative cortical stimulation to map the mentalizing network. *Neuroimage*. 2019;186:628–36. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.046>.
72. Hart RP, Wade JB. Divergent thinking in Alzheimer’s and frontotemporal dementia. *Aging Neuropsychol Cognit*. 2006;13(3–4):281–90. <https://doi.org/10.1080/13825580490904246>.
73. Reiter-Palmon R, Murugavel V. The effect of problem construction on team process and creativity. *Front Psychol*. 2018;9:2098. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02098>.
74. Beaty RE, Johnson DR. Automating creativity assessment with SemDis: an open platform for computing semantic distance. *Behav Res Methods*. 2021;53(2):757–80. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01453-w>.
75. Green AE, Cohen MS, Raab HA, Yedibalian CG, Gray JR. Frontopolar activity and connectivity support dynamic conscious augmentation of creative state: neuroimaging augmented state creativity. *Hum Brain Mapp*. 2015;36:923–34. <https://doi.org/10.1002/hbm.22676>.
76. Prabhakaran R, Green AE, Gray JR. Thin slices of creativity: using single-word utterances to assess creative cognition. *Behav Res Methods*. 2014;46:641–59. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0401-7>.
77. Fink A, Benedek M, Koschutnig K, Pirker E, Berger E, Meister S, Neubauer AC, Papousek I, Weiss EM. Training of verbal creativity modulates brain activity in regions associated with language- and memory-related demands: training of verbal creativity. *Hum Brain Mapp*. 2015;36(10):4104–15. <https://doi.org/10.1002/hbm.22901>.
78. Fink A, Grabner RH, Gebauer D, Reishofer G, Koschutnig K, Ebner F. Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: evidence from an fMRI study. *Neuroimage*. 2010;52(4):1687–95. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.072>.
79. Fink A, Reim T, Benedek M, Grabner RH. The effects of a verbal and a figural creativity training on different facets of creative potential. *J Creat Behav*. 2020;54(3):676–85. <https://doi.org/10.1002/jocb.402>.
80. Sun M, Wang M, Wegerif R. Using computer-based cognitive mapping to improve students’ divergent thinking for creativity development. *Br J Educ Technol*. 2019;50(5):2217–33. <https://doi.org/10.1111/bjet.12825>.
81. Forgeard MJC, Elstein JG. Advancing the clinical science of creativity. *Front Psychol*. 2014;5:613. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00613>.

82. Silvia PJ, Beaty RE, Nusbaum EC, Eddington KM, Levin-Aspenson H, Kwapil TR. Everyday creativity in daily life: an experience-sampling study of “little c” creativity. *Psychol Aesthet Creat Arts*. 2014;8(2):183–8. <https://doi.org/10.1037/a0035722>.
83. Windle G, Gregory S, Howson-Griffiths T, Newman A, O’Brien D, Goulding A. Exploring the theoretical foundations of visual art programmes for people living with dementia. *Dementia*. 2018;17(6):702–27. <https://doi.org/10.1177/1471301217726613>.