



THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par

Quentin MARRE

Le 24 novembre 2023

**Imagerie mentale et mémoire : les apports du paradigme de la
cognition incarnée**

Ecole doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Education, Socialisation,
Cognition**

Spécialité : **Psychologie**

Unité de recherche :

CLLE - Unité Cognition, Langues, Langage, Ergonomie

Thèse dirigée par
Nathalie HUET et Elodie LABEYE

Jury

Mme Valérie Gyselinck, Rapporteur

Mme Pascale Piolino, Rapporteur

M. Guillaume Vallet, Examineur

M. Aymeric Guillot, Examineur

Mme Nathalie HUET, Directrice de thèse

Mme Elodie Labeye, Directrice de thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie Elodie et Nathalie pour m'avoir accordé confiance et liberté, ainsi que leur soutien et leur bienveillance durant toutes ces années.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury pour avoir accepté de prendre du temps pour évaluer mon travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les participants aux différentes études pour m'avoir accordé leurs ressources cognitives, leur temps et leur bonne volonté, l'espace d'un instant, sans lesquels aucun résultat expérimental n'aurait été produit.

Merci à Anna Borghi et au reste de l'équipe du BALLAB de m'avoir accueilli dans leur laboratoire, de m'avoir donné des pistes pour m'améliorer au niveau théorique et méthodologique et de m'avoir permis de découvrir tant de restaurants romains.

Merci à tous mes collègues de bureau pour avoir rendu l'expérience de la thèse plus supportable et particulièrement à Carla pour l'aide de dernière minute sur le manuscrit.

Merci aux doctorants du labo qui ont tous participé chacun à leur manière à mon bien-être dans les locaux.

Merci à mes colloc' Valentin et Dimitri pour m'avoir stimulé intellectuellement tout le long de la thèse et aider à prendre du recul quand j'avais la tête dans le guidon. Et évidemment merci de m'avoir laissé emprunter votre cerveau pour la science lors des prétests.

Merci à ma compagne de longue haleine, ma tendre et chère Camille, pour son soutien émotionnel, pour avoir tenu à relire ad nauseam mon travail tout le long du doctorat et avoir assumé ma part de charge mentale dans le couple durant les dernières semaines de la thèse. Et merci aussi pour avoir fait le cobaye.

Je remercie aussi mes parents pour m'avoir soutenu dans mes choix de vie.

Enfin merci au CLLE pour avoir financé mes déplacements et donc pour m'avoir permis de voir du pays et faire beaucoup de rencontres.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| PARTIE THÉORIQUE | 1 |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. DESCRIPTION DU COGNITIVISME COMPUTATIONNEL..... | 4 |
| 1.1. <i>La cognition comme manipulation de symboles amodaux.....</i> | 4 |
| 1.2. <i>L'impénétrabilité modulaire et l'imagerie mentale comme épiphénomène</i> | 4 |
| 1.3. <i>Des propositions linguistiques à la base de la cognition</i> | 5 |
| 1.4. <i>L'esprit, cette machine à calculer.....</i> | 6 |
| 1.5. <i>Comment le sens émerge-t-il de réseaux de symboles ?</i> | 6 |
| 2. LES ARGUMENTS THÉORIQUES DE LA COGNITION INCARNÉE : POURQUOI LA COGNITION A-T-ELLE BESOIN D'ÊTRE INCARNÉE ?..... | 8 |
| 2.1. <i>La philosophie et l'ancrage des symboles.....</i> | 8 |
| 2.2. <i>L'apport de la linguistique incarnée</i> | 9 |
| 3. LES ARGUMENTS EMPIRIQUES DE LA COGNITION INCARNÉE : À QUOI LE VOIT-ON QU'ELLE EST INCARNÉE ?..... | 17 |
| 3.1. <i>Les paradigmes d'amorçage.....</i> | 17 |
| 4. COGNITION INCARNÉE ET SIMULATIONS MENTALES..... | 24 |
| 4.1. <i>Des simulations pour ancrer la cognition.....</i> | 24 |
| 4.2. <i>Différents types de simulations.....</i> | 25 |
| 5. COGNITION INCARNÉE ET IMAGERIE MENTALE..... | 28 |
| 5.1. <i>Qu'est-ce que l'imagerie mentale ?</i> | 28 |
| 5.2. <i>L'imagerie mentale comme simulation incarnée.....</i> | 28 |
| 5.3. <i>Les preuves de l'ancrage multimodal de l'imagerie mentale</i> | 29 |
| 6. COGNITION INCARNÉE ET MÉMOIRE | 31 |
| 6.1. <i>La récupération mnésique comme reviviscence des expériences sensorimotrices passées</i> | 31 |
| 6.2. <i>Les preuves d'une mémoire incarnée.....</i> | 31 |
| 6.2.1. <i>Agir sur l'encodage des caractéristiques sensorimotrices des stimuli impacte leur récupération ultérieure</i> | 31 |
| 6.2.2. <i>Agir sur la récupération des caractéristiques sensorimotrices des stimuli impacte leur récupération effective</i> | 32 |
| 6.2.3. <i>Le déroulement des processus mnésiques incarnés</i> | 32 |
| 6.2.4. <i>L'importance des aires cérébrales sensorimotrices dans la mémoire</i> | 33 |
| 7. PROBLÉMATIQUE : COGNITION INCARNÉE, MÉMOIRE ET IMAGERIE MENTALE | 34 |
| 7.1. <i>De l'imagerie mentale pour mieux mémoriser ?.....</i> | 34 |
| 7.2. <i>Des failles dans la littérature.....</i> | 35 |
| 7.3. <i>Objectif et hypothèses de la thèse</i> | 36 |
| 7.4. <i>Organisation de la thèse</i> | 38 |
| CHAPITRE 1 : UN CONTINUUM D'INCARNATION POUR LES STRATÉGIES DE MÉMORISATION | 40 |
| Embodied Mental Imagery Improves Memory | 42 |

| | |
|---|------------|
| CHAPITRE 2 : LE RÔLE DU CONTEXTE DANS L'EFFET MNÉSIQUE DE L'IMAGERIE MENTALE | 62 |
| | |
| Context Matters for Memory: Imagining Situated Actions to Retain Words | 66 |
| CHAPITRE 3 : L'IMAGERIE MENTALE POUR MÉMORISER LES MOTS ABSTRAITS..... | 95 |
| Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts..... | 99 |
| CHAPITRE 4 : L'IMAGERIE MENTALE DANS L'APPRENTISSAGE À L'UNIVERSITÉ..... | 136 |
| Introduction | 137 |
| Méthode | 141 |
| Résultats | 143 |
| Discussion | 145 |
| Conclusion & perspectives | 147 |
| DISCUSSION GÉNÉRALE | 151 |
| 1. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS..... | 151 |
| 2. IMPLICATIONS THÉORIQUES..... | 153 |
| Réflexions théoriques sur les mécanismes à l'origine de l'efficacité de l'imagerie mentale | 153 |
| 3. CONTRIBUTIONS MÉTHODOLOGIQUES..... | 155 |
| Démêler l'effet d'incarnation de la profondeur de traitement..... | 155 |
| L'impact de la crise de la répliquabilité sur notre méthodologie | 156 |
| 4. LIMITES..... | 157 |
| Un bénéfice réservé aux performances de rappel | 157 |
| Réflexions sur la pertinence de la mesure de la performance par rappel de mots | 157 |
| Le rôle des états introspectifs dans la mémoire..... | 158 |
| Expérience sur l'efficacité d'une imagerie motrice émotionnelle | 159 |
| Quid des différences interindividuelles ? | 161 |
| Le rôle de l'information linguistique dans la mémoire des concepts abstraits..... | 164 |
| Concepts abstraits et contexte | 166 |
| 5. PERSPECTIVES | 167 |
| CONCLUSION..... | 169 |
| BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE..... | 170 |
| ANNEXES | 194 |
| Annexes du Chapitre 1 | 194 |
| Annexes du Chapitre 2 | 197 |
| Annexes du Chapitre 3 | 201 |
| Annexes du Chapitre 4 | 202 |
| RÉSUMÉ | 211 |
| ABSTRACT | 212 |

PARTIE THÉORIQUE

Introduction

Une image vaut mieux que mille mots. Selon cet adage une représentation graphique serait plus parlante qu'une description verbale. D'où vient cette expérience subjective que les images véhiculent des informations de manière plus directe et plus digeste que les descriptions ? Une réponse qui peut être apportée est que nos processus mentaux, même les plus conceptuels, ne sont fondamentalement pas si éloignés des processus à la base de la perception et de l'action. Vous "voyez" ce que je veux dire, vous "saisissez" l'idée. Pour comprendre ce qu'est une voiture, nous ne récupérons pas sa définition dans une sorte de dictionnaire mental : pour le paradigme de la cognition incarnée, nous faisons comme si nous étions mentalement en train de percevoir et de réinteragir avec une voiture. Cette proposition rentre en conflit avec les conceptions computationnelles de l'esprit humain postulant que la pensée fonctionne à partir de la manipulation de symboles amodaux sur la base de règles syntaxiques, constituant le langage.

Pour des raisons aussi bien théoriques qu'empiriques, certaines théories du paradigme de la cognition incarnée proposent l'existence d'un mécanisme de simulation sensorimotrice et introspective à la base de la cognition. Comprendre et se souvenir d'informations, que ce soit des connaissances conceptuelles ou des épisodes de notre vie, nécessitent de faire ré-émerger, de simuler les expériences corporelles (perceptives, motrices et introspectives) associées à l'interaction avec l'objet ayant créé la trace. Cependant, pour pouvoir récupérer une trace mnésique via de la simulation d'expériences, il faut qu'il y ait des informations expérientielles à simuler constitutives de l'encodage.

De manière cohérente avec cette théorie, la littérature sur l'imagerie mentale a montré que l'activation d'éléments visuels via l'imagerie mentale pour mémoriser des stimuli linguistiques amenait à de meilleures chances de récupération que des conditions expérimentales sans imagerie mentale. Cependant, cette littérature néglige le rôle des expériences autres que visuelles dans la mémoire et ignore le fait que des imageries mentales impliquant des éléments moteurs et introspectifs pourraient être plus adaptées à notre système cognitif incarné. Par ailleurs, cette littérature ne décrit pas ses résultats expérimentaux dans une perspective incarnée, bien que la nature fondamentalement sensorimotrice des processus mnésiques explique aisément les effets positifs de l'imagerie mentale.

Au regard de ces éléments, l'approche générale de cette thèse consiste à explorer les bénéfices mnésiques de l'imagerie mentale à partir d'hypothèses qui s'inscrivent dans le

paradigme de la cognition incarnée. En retour, l'objectif est de mettre en évidence de nouveaux arguments en faveur d'une description incarnée et situées des processus mnésiques. De façon plus précise, nous proposons que si l'imagerie mentale est une simulation sensorimotrice et que la récupération mnésique repose elle aussi sur ce même mécanisme, alors l'utilisation de l'imagerie mentale en tant que stratégie de mémorisation maximisera les chances de récupération d'une trace. Ce travail de thèse explore notamment la notion de continuum d'incarnation allant de stratégies peu incarnées n'impliquant pas d'imagerie mentale, à des stratégies plus incarnées et situées, impliquant une imagerie mentale riche en interactions sensorimotrices et introspectives.

La partie théorique visera à présenter le paradigme de la cognition incarnée. A cette occasion, nous prendrons d'abord le temps d'exposer la conception cognitiviste computationnelle afin de mieux comprendre à quoi le courant de la cognition incarnée s'oppose. Ensuite, nous exposerons les contre-arguments du paradigme de la cognition incarnée ainsi que son argumentaire empirique. Dans un quatrième temps, nous traiterons de la notion de simulation mentale, un mécanisme proposé par certains chercheurs comme à l'origine des processus cognitifs. Une fois ceci fait, nous verrons en quoi l'imagerie mentale et la mémoire émergent à partir de simulations mentales incarnées. Nous terminerons cette partie théorique en exposant la problématique de la thèse qui articule cognition incarnée, mémoire et imagerie mentale à travers la notion du continuum d'incarnation. L'objectif sera d'explorer l'effet sur la récupération mnésique d'encodages orientés sur différents aspects sensorimoteurs en comparant des consignes d'imagerie mentale uni ou multimodales à des consignes sans imagerie.

Le corps de la thèse est ensuite constitué de quatre chapitres dont trois contenant un article scientifique publié ou soumis dans une revue internationale à comité de lecture. Ces trois articles sont écrits en anglais mais sont précédés d'un résumé en français qui les remet dans le contexte de la thèse. Dans le premier chapitre, nous testons l'hypothèse selon laquelle l'efficacité mnésique est corrélée à un continuum d'incarnation allant de stratégies peu incarnées n'impliquant pas d'imagerie mentale, à des stratégies plus incarnées impliquant une imagerie mentale riche en interactions sensorimotrices. Nous comparons, face à une condition contrôle sans imagerie, trois types d'imagerie supposées varier dans leur niveau d'incarnation et donc d'efficacité mnésique. Néanmoins, une imagerie encore plus efficace comporterait en complément une dimension située. C'est donc pour cela que dans le deuxième chapitre, nous testons l'idée selon laquelle la présence des éléments sensorimoteurs est d'autant plus utile sur le plan mnésique qu'ils sont intégrés dans une situation cohérente. Nous avons également supposé que la simulation d'expériences en tant que mécanisme de récupération mnésique devait être valable autant pour la récupération de concepts concrets que de concepts abstraits, ce qui ferait donc de l'imagerie mentale un moyen de mémorisation efficace, y compris dans

le cas de concepts abstraits traditionnellement vus comme “désincarnés”. Ce point est abordé dans le troisième chapitre. Enfin, à l’occasion d’un quatrième et dernier chapitre, nous avons testé nos prédictions selon lesquelles les bénéfices mnésiques issus d’une imagerie mentale incarnée peuvent s’appliquer à des situations d’apprentissage universitaire (e.g., apprentissage de concepts de cours), ce contexte étant plus écologique que les études en laboratoire des trois premiers chapitres qui testaient la mémorisation de listes de mots isolés. Des réflexions finales clôtureront la thèse lors d’une discussion générale et d’une conclusion.

1. Description du cognitivisme computationnel

Le paradigme de la cognition incarnée constitue l'ancrage théorique de ce travail de thèse. Afin de le définir, il est indispensable en premier lieu de comprendre les raisons de son émergence.

1.1. La cognition comme manipulation de symboles amodaux

L'idée principale de l'approche computationnelle traditionnelle de la pensée humaine suggère que les processus mentaux consistent en une manipulation de symboles, selon des règles "syntaxiques", algorithmiques. Ces symboles sont abstraits, c'est-à-dire que le symbole représentant le concept de "table" peut représenter plusieurs instances de tables. Ils sont également amodaux, autrement dit, la nature de la représentation d'une table est la même, qu'on écrive le mot ou qu'on le dise. Enfin, ces symboles sont arbitrairement reliés à leur référent, la représentation de la table, tout comme le mot "table", n'a pas de ressemblance physique avec l'objet concret qu'elle désigne. La plupart du temps, les manipulations des symboles auraient lieu dans des centres de raisonnement, séparés des systèmes périphériques supportant les fonctions perceptives et motrices. Le cerveau humain serait organisé en modules hyperspécialisés, indépendants, impénétrables et dissociés de la cognition "centrale", la pensée (Fodor, 1983). L'expression sans doute la plus aboutie de cette vision modulaire est l'architecture cognitive ACT-R (Anderson, 2007) selon laquelle le système cognitif et le cerveau sont divisés en plusieurs modules indépendants. Par exemple, pour résoudre l'équation " $3x - 5 = 7$ ", un module visuel maintient la représentation visuelle de l'équation, un module état-problème maintient l'avancée en temps réel de la résolution " $3x = 12$ ", un module de contrôle/but maintient l'intention de résoudre l'équation, le module de mémoire déclarative qui peut permettre de se remémorer que $7 + 5 = 12$ et enfin le module manuel qui permet d'écrire la solution " $x = 4$ ". Au centre de ce système, un module procédural (ou système de production) accède aux sorties des différents modules et agit sur eux via des "productions". La cognition serait donc en somme une série de "productions" s'exécutant sur les différents modules.

1.2. L'impénétrabilité modulaire et l'imagerie mentale comme épiphénomène

Notre expérience subjective peut nous amener à croire que notre pensée, au contraire, ne repose pas sur un traitement de symboles amodaux, étant donné que l'on peut parfois « être sujet » à de l'imagerie mentale (*i.e.*, voir des images dans notre tête) lorsque l'on pense. Cette catégorie d'expériences est, selon l'approche computationnelle, épiphénoménale ; ces

expériences ne témoignent pas du fait que les représentations mentales à l'origine de ce phénomène sont fondamentalement visuelles. Pour ce courant, ces processus d'apparence "modale" seraient en fait sous-tendus par des symboles amodaux. S'il nous est demandé d'imaginer une moto démarrer puis un camion faire de même, il est très probable que nous imaginions le dernier aller plus lentement. Pour Zenon Pylyshyn (1981), ceci est due à notre connaissance tacite du lien entre masse et accélération, connaissance qui modifie la représentation à la base de l'image mentale. Si nos connaissances peuvent modifier cette représentation c'est que cette dernière est dans un format similaire, soit un format symbolique, computationnel, régie par des règles algorithmiques. Le fait que la représentation à la base de l'image mentale soit sensible aux connaissances et croyances témoigne du fait qu'elle est "pénétrable" par les processus computationnels. Ainsi, la représentation sémantique à la base de l'image mentale est une représentation symbolique, qui n'est pas dans un format *analogue* aux représentations formées lors de la perception visuelle dans le module visuel qui lui est impénétrable par ces processus cognitifs. Cette impénétrabilité est un aspect théorique important des théories modulaires. En 1999, Pylyshyn postule que la perception visuelle (de "bas niveau") est séparée de la cognition et ne peut donc pas être influencée par les attentes et les connaissances de l'individu. Le module visuel a pour fonction de traiter un signal entrant, de "calculer" les propriétés visuelles des objets perçus et de déduire les informations visuelles manquantes en "comblant les trous", le tout sans faire appel aux fonctions "supérieures". Ce module est "encapsulé", soit cognitivement impénétrable. La cognition n'intervient que pour diriger l'attention visuelle vers un endroit particulier du champ visuel et pour analyser la représentation visuelle produite par le module, sans intervenir de ce fait dans les calculs qui ont conduit à cette représentation. C'est donc à ce moment que la cognition peut faire appel à des connaissances stockées en mémoire à long-terme pour les mettre en relation avec ce produit du module visuel. Pour reconnaître une personne familière, nous devons d'abord analyser son visage, puis seulement une fois que le module a fait son travail, nous devons mettre en lien la représentation visuelle avec nos connaissances en mémoire sur l'identité de cette personne.

1.3. Des propositions linguistiques à la base de la cognition

Les expériences d'imagerie mentale ne pourraient donc pas être supportées par un représentation un format pictural. Certains proposent qu'à l'origine de ces expériences visuelles, se trouvent des descriptions d'images mentales, en mentalais (*mentalese*), le "langage de la pensée" (Fodor, 1975 ; Pylyshyn, 1973). Par exemple, le mot "baleine" a son équivalent en mentalais, de même que "mammifère". Ces deux représentations mentales peuvent se combiner en une phrase en mentalais "Les baleines sont des mammifères". Ainsi, penser que les baleines sont des mammifères est sous-tendu par cette phrase en mentalais.

Faire l'inférence selon laquelle Moby Dick est un mammifère, c'est par conséquent s'engager dans une succession de transformations de phrases : "Les baleines sont des mammifères" → "Moby Dick est une baleine" → "Moby Dick est un mammifère" (Rescola, 2019). Si au cours de ces processus, des images ou autres sensations viennent à l'esprit, ce n'est que secondaire et non essentiel au déroulement de ces opérations mentales. C'est de ce fait le langage de la pensée qui donne sens aux images et non les images qui donnent son sens au langage. Ces propositions linguistiques seraient aussi à l'origine de la compréhension de texte (Kintsch & van Dijk, 1978) et seraient composées d'un prédicat (en général un verbe, adjectif ou adverbe) et d'un ou des arguments (agents, objets ou buts). Ainsi, la représentation sémantique de la phrase "Le chat court après la souris verte" est une combinaison de deux propositions : "Courir (prédicat), chat (argument 1), proposition 2 (argument 2)" et la proposition 2 étant "Verte (prédicat), souris (argument)".

1.4. L'esprit, cette machine à calculer

Bien que le cognitivisme computationnel prenne réellement de l'ampleur après la seconde moitié du XX^{ème} siècle, on peut déjà en trouver les prémises dans des travaux plus anciens comme le *Principia Mathematica* de Whitehead et Russell (1910-1913) qui proposait déjà des systèmes de symboles pouvant être organisés de différentes manières de façon à créer des propositions complexes, le tout selon des règles énonçant comment créer de nouveaux ensembles de symboles à partir d'anciens (Clark, 2001).

L'esprit fonctionnerait donc comme un ordinateur au sens des machines de Turing (Alan Turing, 1937) qui sont des machines abstraites et automatiques manipulant des symboles en suivant une série d'instructions simples simulant ainsi des processus de raisonnement formel (en somme, des algorithmes). Comme l'humain, l'ordinateur (dans le sens *computer* qui *compute*, c'est-à-dire calcule) peut manipuler des symboles abstraits, effectuer des calculs, et ce malgré un substrat physique différent. La nature du support physique (le *hardware*) dans lequel les opérations symboliques (le *software*) sont exécutées n'est pas essentielle, pourvu qu'il soit capable de les accueillir. Par ailleurs, la non-prise en compte du support particulier qu'est le cerveau sera critiquée par la suite. Par exemple, Sternberg (1966), qui faisait des expériences dans une approche purement symbolique, s'est vu reproché en 1973 par Anderson de faire des prédictions de décours temporel invraisemblables d'un point de vue biologique concernant le scanning d'informations en mémoire à court terme.

1.5. Comment le sens émerge-t-il de réseaux de symboles ?

Si un symbole est amodal, arbitraire et abstrait, comment fait-il pour contenir du sens ? Ce dernier émergerait du réseau dans lequel il est intégré, c'est-à-dire à partir de son

pattern de relation (e.g., relations catégorielles, de propriété, associatives) avec les autres nœuds du réseau sémantique (Collins & Loftus, 1975¹). Deux concepts ont alors une haute similarité sémantique dès lors qu'ils partagent plusieurs propriétés. Une voiture bleue et une voiture rouge, malgré l'absence de superposition au niveau de la couleur, dispose d'un certain nombre de liens de par leurs propriétés communes (e.g., elles ont quatre roues, ce sont des véhicules, elles sont toutes deux reliées au concept de route ainsi qu'à d'autres membres de la catégorie des véhicules).

Ainsi, on comprendrait le mot "chaise" en activant un symbole "chaise" qui diffuserait son activation aux nœuds alentour auxquels il est relié, entre autres, au symbole de "table" et à la catégorie "meubles" par une relation d'appartenance. Cette idée s'observe bien dans le concept de "meaningfulness", qui est le nombre moyen d'associations verbales qu'un mot évoque dans une période de 60 secondes (Noble, 1952). C'est une mesure censée quantifier le contenu sémantique d'un mot, et est donc considérée comme une mesure du réseau conceptuel dans lequel est intégré un mot. Ce score de "meaningfulness" était ainsi considéré comme un contributeur important de l'apprentissage verbal (Noble et al., 1957).

Bien que toutes les approches computationnelles ne fassent pas de division stricte entre les systèmes centraux et les systèmes périphériques sensori-moteurs, elles soutiennent néanmoins qu'une représentation mentale peut être débarrassée des éléments sensori-moteurs et par conséquent devenir un symbole amodal (Kemp et al., 2008 ; Perfors et al., 2011). Selon Mahon (2015), le traitement conceptuel reposerait sur l'activation de représentations amodales qui éventuellement provoquerait une activation en cascade jusqu'aux systèmes sensorimoteurs. L'activation du système visuel, si nous pensons à un coucher de soleil, ne serait donc qu'une conséquence de l'activation du concept de coucher de soleil. De ce fait, ces aspects sensorimoteurs ne feraient pas partie de la représentation conceptuelle en soi. Il y aurait donc un "embrayage" qui permettrait de faire l'interface entre les représentations amodales et modales et de désengager la pensée des processus sensori-moteurs lorsqu'elle n'est pas nécessaire. Sur le plan cérébral, les connaissances conceptuelles seraient stockées de manière adjacente aux représentations modales et plus précisément sur la partie antérieure de ces zones, comme le soutient l'hypothèse de l'*anterior shift* (e.g., les concepts de couleur seraient stockés dans la partie antérieure du cortex visuel, et les réseaux de neurones responsables de la perception visuelle pris en charge par la partie postérieure, Simmons et al., 2007).

¹ Ce modèle théorique est inspiré du modèle de Quillan (1967), conçue pour être supporté par des ordinateurs des années 1960, ce qui peut expliquer son aspect amodal

2. Les arguments théoriques de la cognition incarnée : pourquoi la cognition a-t-elle besoin d'être incarnée ?

2.1. La philosophie et l'ancrage des symboles

À partir des années 1980, la philosophie a commencé à mettre en exergue les problèmes théoriques induits par le fait de postuler l'existence de symboles amodaux (Harnad, 1990 ; Searle, 1980). Ces derniers posent en effet un problème d'ancrage des symboles. Harnad (1990) a proposé une expérience de pensée faisant l'analogie entre un modèle symbolique de la cognition humaine et un dictionnaire circulaire. Imaginez que vous ayez à apprendre le chinois mais que votre seule source d'information soit un dictionnaire chinois. Lire le dictionnaire consisterait à regarder des symboles incompréhensibles, définis par d'autres symboles incompréhensibles, par exemple, la définition de 苹果 est “苹果, 又稱柰或林檎, 是苹果树的果实, 一般呈紅色, 但需視品種而定, 富含矿物质和维生素, 是人们最常食用的水果之一”. Malgré la connaissance des relations entre les symboles, par exemple que 苹果 fait partie de 苹果树 et qu'il s'agit d'un 水果 et même en disposant d'un temps conséquent, vous aurez beaucoup de mal à comprendre quoi que ce soit. Maintenant, imaginez que vous ayez à apprendre le chinois avec ce dictionnaire chinois mais que le chinois est la première langue que vous deviez apprendre dans votre vie, sans connaître une autre langue au préalable donc. La situation paraît encore plus insurmontable, et c'est pourtant ce qu'impliquent les approches purement symboliques. Harnad démontre ainsi qu'il n'est pas possible qu'un réseau de symboles amodaux trouve son sens dans d'autres symboles amodaux. Pour trouver leur sens, les symboles ont par conséquent besoin d'être ancrés dans des expériences non-linguistiques.

Combien de temps faudrait-il à un esprit normalement constitué pour commencer à faire du sens à partir de telles informations ? Depuis Harnad, des propositions ont été faites par la linguistique distributionnelle et il s'avèrerait que certains modèles puissent produire des sorties se rapprochant de la compréhension humaine, uniquement à partir d'information linguistique ; cette dernière est par définition amodale, puisqu'un ordinateur ne peut faire directement l'expérience des concepts qu'il traite. Mais, aussi impressionnantes que peuvent paraître les sorties d'intelligences artificielles comme ChatGPT (OpenAI, 2023), s'agit-il vraiment de compréhension au sens humain (cf. la chambre chinoise de Searle, 1980) ? Même en acceptant ce dernier postulat, la quantité d'information linguistique nécessaire à cette compréhension n'est pas plausible d'un point de vue humain. Ces modèles ont en effet besoin d'avoir accès à des bases de données textuelles de plusieurs millions de mots (e.g., le modèle de HAL de Lund & Burgess, 1996) voire plusieurs centaines de milliards pour les *Large Language Models* comme ChatGPT (donc plus que ce à quoi un humain peut être exposé au cours de sa vie), alors qu'il est beaucoup moins coûteux pour un humain de générer du sens

pour des mots nouvellement appris. Nous, humains, avons accès à une source d'informations à laquelle les intelligences artificielles n'ont pas (encore) accès : le monde physique, au-delà des données textuelles le décrivant. Ainsi, en relativement peu d'occurrences, nous pouvons apprendre ce qu'est un coing si on nous le montre ou que l'on nous le fait goûter, et nous aurons très certainement besoin que cela arrive moins d'une dizaine de fois au cours de notre vie pour former une conception claire de cet objet.

2.2. L'apport de la linguistique incarnée

La linguistique a également été intégrée au débat par l'entremise des travaux de George Lakoff et Mark Johnson (1980). Ces derniers ont constaté l'omniprésence de métaphores conceptuelles dans notre langage, qui nous permettent de comprendre des concepts abstraits en termes d'autres concepts plus concrets. On distingue des métaphores orientationnelles (*e.g.*, le contrôle est en haut, le bien est en haut) ; des métaphores ontologiques qui associent le statut d'une entité à quelque chose qui n'a pas intrinsèquement ce statut (l'esprit est un récipient, *e.g.*, "Je ne peux pas me sortir cette musique de la tête.", ou encore, les mots sont des récipients dont les idées sont le contenu, *e.g.*, "Ces mots sont vides de sens.", "Essaie de faire passer plus d'idées dans moins de mots.") ; et des métaphores structurelles qui consistent en la structuration d'une expérience ou activité en termes d'une autre expérience ou activité (*e.g.*, "comprendre c'est voir", "la vie est un jeu de hasard"). Ces métaphores conceptuelles seraient dès lors la preuve indirecte que nous aurions besoin de l'expérience directe pour donner du sens aux symboles, aux concepts.

Un autre élément apporté par la linguistique computationnelle peut être utilisé comme argument en faveur de la cognition incarnée : le schéma de Winograd (Levesque et al., 2012). Il s'agit d'un test destiné à évaluer les capacités d'un système informatique à traiter le langage. Ce test consiste à traiter des phrases contenant une anaphore comme "J'ai mis le torchon sur le meuble afin de le protéger". Si le système informatique est capable de déterminer avec justesse ce à quoi fait référence le dernier "le", alors ce système peut être qualifié d'intelligent et capable de traiter le langage naturel. Or, encore aujourd'hui, les différentes tentatives en intelligence artificielle restent très limitées. Actuellement (en août 2023), ChatGPT (OpenAI, 2023)² n'est pas capable de donner une réponse vraisemblable. A la question "Dans la phrase "J'ai mis le torchon sur le meuble afin de le protéger", à quoi fait référence le dernier "le" ?", il répond "Dans la phrase "J'ai mis le torchon sur le meuble afin de le protéger", le dernier "le" fait référence au mot "torchon". La phrase signifie que le locuteur a placé le torchon sur le meuble dans le but de protéger le torchon lui-même". Les humains, eux, n'ont que très peu de mal à comprendre que "le" fait référence au meuble. Cette aisance pourrait être attribuée à

² Une investigation plus systématique a montré que chatGPT était capable d'avoir environ 73% de bonnes réponses sur 273 tests, là où les humains en ont 100% (Kelly, 2023).

notre capacité à simuler l'agencement des différents objets dans une scène visuelle et à simuler les potentielles évolutions de cette scène. En visualisant un torchon sur un meuble et en prédisant que les objets touchant la surface du meuble doivent forcément toucher le torchon, on peut ainsi en déduire la fonction protectrice du torchon. Cette explication semble par ailleurs plus parcimonieuse qu'une explication mobilisant uniquement le contexte linguistique comme suffisant.

2.3. Une psychologie cognitive ancrée

La psychologie a aussi apporté son lot d'arguments, en particulier Lawrence Barsalou à l'occasion de la présentation de son *Perceptual Symbol System* (1999). Un des problèmes qu'il évoque est celui de la transduction. Un système de symboles amodaux suppose que les états perceptifs se convertissent en symboles amodaux dans le système conceptuel. Le fait de voir une chaise crée un certain état dans notre système nerveux perceptif, état qui serait traduit en symbole amodal "chaise" avec une série de propriétés (p1 = "a un dossier", p2 = "a une assise", p3 = "a quatre pieds"). Étant donné que le processus de transduction n'a jamais été décrit précisément, Barsalou propose un processus plus parcimonieux : il n'y a pas de conversion, de changement de format entre l'état du système nerveux et la représentation conceptuelle finale. Face à l'exposition à une chaise, le système cognitif va extraire les caractéristiques visuelles principales des chaises et constituer une trace visuelle de la chaise prototypique, un "symbole perceptuel". Les réseaux de neurones recrutés pour créer ces symboles sont dans les systèmes cérébraux sensorimoteurs. Si l'on est confronté à plusieurs chaises, plusieurs symboles perceptuels de chaises vont être créés, et les réseaux sensorimoteurs leur correspondant peuvent s'associer afin de représenter la catégorie "chaise". Le tout se fait donc sans qu'il y ait eu à se débarrasser des caractéristiques sensorimotrices reliées à l'objet chaise.

On peut également citer le problème de redondance qu'implique un système de symboles amodaux. Si un symbole amodal a une relation arbitraire avec son référent, comment fait-il pour servir à la compréhension d'un objet physiquement absent ? Si je dois me projeter dans le futur et savoir si une chaise passe dans le coffre de ma voiture sans avoir la chaise en face de mes yeux, comment aboutir à un raisonnement correct si le symbole amodal que j'utilise ne contient pas l'information de ce à quoi ressemble visuellement une chaise ? Une solution à ce problème pourrait être de proposer que les symboles amodaux soient systématiquement médiés par une représentation modale qui serait utilisée dans ce type de problème. Ceci reste cependant problématique car le symbole amodal devient totalement redondant. Pourquoi alors le système conceptuel n'utiliserait pas directement la représentation perceptuelle ?

L'hypothèse amodale a souvent été considérée comme l'hypothèse nulle face à laquelle une hypothèse incarnée est testée. Si l'hypothèse incarnée n'est pas corroborée par les données, l'hypothèse amodale est considérée comme vraie par défaut, ce qui est une forme d'inversion de la charge de la preuve. L'hypothèse amodale est pourtant moins parcimonieuse que la proposition de la cognition incarnée car ontologiquement moins simple que cette dernière (Hesslow, 2012). Ce qui rend cette approche d'autant plus parcimonieuse, c'est sa capacité à établir une continuité avec les autres espèces animales (Barsalou, 1999, Wilson, 2008). Expliquer les comportements intelligents chez les autres animaux sans créer de construit théorique supplémentaire ou théoriquement coûteux, étant donné que pour cette approche, la cognition est possible dès lors qu'un organisme peut supporter un système visuel et moteur.

2.4. La proposition du paradigme de la cognition incarnée

En somme, pour le paradigme de la cognition incarnée, les moyens par lesquels nous entrons en interaction (la perception, l'action, etc.) avec le monde ne sont pas différents des processus mentaux. Les processus cognitifs ne sont pas fondamentalement différents en nature des processus pris en charge par les systèmes traditionnellement considérés comme "périphériques". Ainsi, les caractéristiques de la cognition sont nombreuses à être "causalement ou même constitutivement reliées au corps physique et aux actions corporelles d'un agent" (Gallese & Sinigaglia, 2011, p. 512). Le corps n'est plus vu comme une enveloppe charnelle qui entourerait l'esprit, telle une coquille qui protégerait son fruit, mais comme faisant partie intégrante de l'esprit humain. Il va donc de soi que toutes les approches incarnées de la cognition rejettent au minimum l'idée selon laquelle des symboles amodaux puissent, de manière autonome, gérer des processus mentaux comme la compréhension du langage ou la mémoire. Il semble néanmoins utile de préciser que la cognition incarnée ne postule pas que les états du corps influencent les états de l'esprit³. Cette théorie a en fait une vision bien plus radicale : les états du corps sont les états de l'esprit (Wilson & Golonka, 2013).

Malgré ces arguments, le paradigme de la cognition incarnée a difficilement trouvé sa place dans la littérature scientifique avant les années 2000. L'hypothèse d'un format symbolique fut bien souvent privilégiée pour un certain nombre de processus qui sont pourtant à présent acceptés comme étant en grande partie incarnés. Par exemple, il a été observé à plusieurs reprises dans la littérature que le fait d'imaginer un mouvement augmenterait les chances de bien l'exécuter par la suite. En 1994, James Driskell considère plusieurs interprétations dont une symboliste et une autre qui serait aujourd'hui considérée

³ Les approximations à ce sujet sont vite faites dans la presse de vulgarisation scientifique : le magazine *Cerveau & Psycho* a dédié un numéro entier à la cognition incarnée en titrant "Quand le corps stimule la pensée" (Bohler, 2019).

comme incarnée : l'imagerie motrice pré-activerait le système nerveux moteur et donc le préparerait à la bonne exécution du mouvement. Il préférera néanmoins la position selon laquelle l'imagerie motrice réorganiserait les symboles constituant les schémas moteurs utilisés pour exécuter le mouvement. Il a donc été longtemps considéré qu'une position modaliste (à l'inverse d'amodaliste) ne pouvait pas avoir de "sérieux adhérents" (Kieras, 1978, p. 532). Pourtant, cette position symboliste n'a pas toujours été dominante en psychologie. En fait, avant la révolution cognitive au milieu du XX^{ème} siècle, c'est la position inverse qui était plus souvent acceptée. La position *analogue* du langage et de la mémoire humaine était notamment soutenue par William James (1890, p. 265), qui estimait que le sens des mots (concrets) "est constitué d'images sensorielles éveillées". Plus tard, avant l'émergence du paradigme de la cognition incarnée, on peut également trouver certains chercheurs qui estimaient qu'une position analogue relevait du bon sens. Roger Shepard écrit en 1966 : "Si l'on me demande maintenant le nombre de fenêtres de ma maison, je constate que je dois visualiser la maison, vue depuis différents côtés ou depuis l'intérieur des différentes pièces, puis compter les fenêtres présentées dans ces diverses images mentales. Aucune machination purement verbale ne semble suffire" (p. 203).

2.5. Abstraction n'est pas amodalité

L'une des positions les plus faussement attribuées à la cognition incarnée est sans doute que, comme cette approche rejette la notion d'amodalité, elle nie la capacité d'abstraction du système cognitif humain. La cognition incarnée ne rejette pas la notion d'abstraction. Dans le système de symboles perceptuels de Barsalou (1999), ces derniers sont des représentations neurales (dans les aires sensorimotrices) des composantes schématiques de l'expérience perceptive. Des symboles perceptuels reliés peuvent s'associer en un "simulateur". Ce simulateur "permet au système cognitif de construire des simulations spécifiques d'une entité ou d'un événement en son absence" (p. 586). Autrement dit, sur le plan conceptuel, ces simulateurs représentent les catégories, et les simulations sont les exemplaires d'une catégorie. Le simulateur de la catégorie "voiture" peut déclencher une simulation spécifique de Twingo bleue ou de Fiat 500 rouge dans le système visuel (et éventuellement conduire à la visualisation consciente de cette dernière). Le simulateur contient les caractéristiques communes à ces voitures spécifiques. Le réseau de neurones à la base du simulateur garde des informations, certes, moins spécifiques que les réseaux sous-tendant les simulations d'exemplaires, mais ces informations ne sont pas amodales, elles sont seulement plus abstraites (au sens superordonnées) et surtout elles conservent une nature sensorimotrice (voir la notion de compression multimodale plus bas dans cette partie). Cette même idée peut être aussi trouvée dans des modèles incarnés de la mémoire comme Act-In (Versace et al., 2014) qui considère que le cerveau produit des connaissances catégorielles

(typiquement associées à la mémoire sémantique) abstraites en accumulant des expériences sensorimotrices et affectives (traditionnellement associées à la mémoire épisodique). Ces connaissances émergeraient d'un mécanisme d'activation inter-trace (soit la diffusion d'activation entre différentes traces mnésiques provoquée par un stimulus) puis d'intégration multi-composants (soit l'intégration des composants activés par l'activation inter-trace). Par exemple, voir un chien active toutes les traces mnésiques où un chien a été vu. Cette activation s'étend également à l'intérieur d'une même modalité et à l'intérieur de chaque trace individuelle, ce qui active tous leurs composants sensorimoteurs (e.g., bruits d'aboiements, odeur du chien, texture des poils). Toutes ces activations sont ensuite intégrées entre elles pour former un tout unifié et permettre alors l'émergence de connaissances catégorielles, ici le concept de "chien".

Un des problèmes conceptuels soulevé par le concept d'amodalité, est que la plupart des chercheurs parlant d'amodalité parlent en fait de *multimodalité* (Barsalou, 2016). Cette confusion entre amodalité et multimodalité se retrouve dans les arguments empiriques amodalistes. En effet certains processus sont vus comme amodaux car pouvant être déclenchés par différentes modalités. Par exemple, sous prétexte qu'il est possible de se faire une représentation spatiale autant par le biais de stimuli visuels qu'auditifs et que les personnes aveugles peuvent se faire une telle représentation spatiale au même titre que les personnes voyantes (Delogu et al. 2010 ; Riccardi et al., 2017), l'imagerie spatiale est considérée par Palmiero et collaborateurs (2019) comme amodale. Certes, si de tels processus amodaux existaient, ils pourraient être mobilisés via différentes modalités, mais une telle caractéristique pourrait être aussi bien supportée par des mécanismes multimodaux, à l'interface de différentes modalités. Ainsi, l'amodalité implique la multimodalité mais la multimodalité n'implique pas l'amodalité. On ne peut donc pas déduire qu'un processus est amodal seulement à partir d'une preuve de multimodalité. La communication inter-modale est, par ailleurs, théoriquement supportée par le paradigme de la cognition incarnée (e.g. l'effet de généralisation multisensorielle chez Brunel et al., 2003). On peut se représenter le concept de citron visuellement et gustativement, cela n'en fait pas pour autant une représentation amodale.

Ainsi une représentation peut être abstraite sans être amodale. Barsalou (2017) propose que les représentations multimodales à la base des concepts soient dans un format, certes plus abstrait que les représentations modal-spécifiques de plus bas niveau, sans toutefois être amodal car il préserve des caractéristiques sensorimotrices. Ces informations multimodales sont seulement compressées dans des réseaux au nombre limité de neurones (d'où la compression d'information). Ces derniers se trouvent dans les aires cérébrales associatives et plus particulièrement dans des zones de convergences (Damasio, 1989 ; Meyer & Damasio, 2009) composées de réseaux de neurones conjonctifs faisant le lien à travers les

différentes modalités. Ces représentations pourraient se suffire à elles-mêmes pour supporter le traitement conceptuel (étant donné qu'elles restent modales) mais pourraient aussi servir d'intégrateur ou de pointeur à travers les différents systèmes modaux pour générer des simulations plus spécifiques.

Cette position contredit alors le postulat de chercheurs comme Mahon (2015), mentionné plus tôt dans la description du cognitivisme computationnel (section 1.5, p. 6), selon lequel les représentations conceptuelles sont stockées dans un format amodal de manière adjacente aux réseaux de neurones supportant les représentations modales (qui ne sont considérées que comme la conséquence de l'activation amodale préalable). Les supposées représentations amodales stockées de manière adjacente aux représentations modales peuvent être des représentations abstraites multimodales (cf. Barsalou, 2017, discuté dans le paragraphe ci-dessus). De plus, il est théoriquement incohérent avec l'architecture cérébrale de postuler que des représentations amodales seraient stockées dans des zones modales, notamment parce que, sur le plan phylogénétique, les zones cérébrales qui ont bénéficié d'une expansion sont les zones associatives, et non les zones modal-spécifiques. S'il y a donc un endroit où les représentations amodales pourraient en théorie être stockées, c'est dans les zones associatives, ce qui fait des zones de convergence de meilleures candidates comme substrat des représentations conceptuelles de haut niveau (Barsalou, 2017).

2.6. Plusieurs visions incarnées

Compte tenu du fait qu'il n'y a pas de théorie incarnée unifiée, il existe plusieurs approches incarnées. Certains travaux mettent l'accent sur le rôle prépondérant de l'action et des affordances liées aux objets (i.e., les potentialités d'action). Les approches dites énoncivistes rentrent dans cette catégorie. Ces dernières proposent que la cognition émerge de l'interaction entre un organisme et son environnement. La perception, la pensée et la connaissance seraient le résultat de l'activité conjointe de l'organisme et de son contexte, plutôt que d'être principalement le produit de processus mentaux internes ou de représentations mentales. Par conséquent, les visions les plus radicales nient l'existence de représentations mentales internes. Le cerveau a une place moins centrale. La cognition est vue comme plus intégrée au corps tout entier, aux conditions intersubjectives et environnementales. "Plutôt que représentant et traitant de l'information, le cerveau est conçu comme un agent participant à l'action" (Gallagher & Bower, 2014, p. 240). En cela, elles se démarquent des versions plus cognitivistes de la cognition incarnée comme celle de Barsalou (1999). L'approche sensorimotrice de O'Regan et Noë (2001) peut également faire partie de cette catégorie. Ces auteurs proposent que la conscience visuelle (i.e., faire l'expérience de voir des choses) n'est pas créée par l'activation d'une représentation visuelle interne, produite par le système visuel. Plutôt, voir serait un moyen d'agir, d'explorer l'environnement. Une

expérience visuelle émerge lorsque “l’organisme maîtrise les lois qui gouvernent les contingences sensorimotrices” (O’Regan & Noë, 2001, p. 1). Au cours de sa vie, un organisme apprend comment les entrées sensorielles changent en fonction de l’action (e.g., comment les stimulations visuelles varient en fonction des actions d’exploration de l’objet). Voir c’est donc pratiquer une connaissance sur les règles de covariation entre le stimulus et l’action. Par exemple, le cerveau “sait” qu’une simulation est visuelle car lorsque l’œil bouge, la stimulation change. Au contraire, une stimulation auditive ne sera pas affectée par les mouvements des yeux. D’autres types d’expériences subjective sont ainsi créées par la pratique de règles de contingences sensorimotrices : je fais l’expérience de la mollesse d’une éponge car si j’appuie sur elle (action), elle cède à la pression que j’exerce (feedback sensoriel). De ce fait, pour toutes ces approches, l’action et la perception sont indissociables.

D’autres travaux considèrent que la cognition est ancrée dans les modalités sensorimotrices sans forcément mettre l’action sur un piédestal par rapport aux autres systèmes. Ils ont une vision plus internaliste de la cognition et ne rejettent pas la notion de représentation et le rôle central du cerveau dans la cognition. Ceci en fait une vision plus proche du cognitivisme traditionnel, comme en témoigne le système de symboles perceptuels de Barsalou (1999) selon lequel la cognition consiste en l’activation de symboles perceptuels plus ou moins abstraits stockés dans des réseaux de neurones au niveau des aires sensorimotrices ou associatives.

Quelques modèles ont fait un compromis entre une vision incarnée et une vision symbolique. Ces modèles hybrides acceptent l’idée de symboles amodaux (qui se suffiraient à eux-même) et de mécanismes incarnés qui se mettent en place dans certains contextes (e.g., Dove, 2016 ; Kuhnke et al., 2023 ; Popham et al., 2021 ; Reilly et al., 2016). L’étude de Popham et ses collègues en IRMf propose que, à la limite du cortex visuel, les concepts sont stockés dans des réseaux de neurones distincts sous deux formes : une forme linguistique et une forme visuelle, la forme linguistique étant la plus abstraite. Chaque réseau de neurones visuels aurait son équivalent linguistique positionné de manière adjacente de l’autre côté d’une “barrière” qui séparerait les deux types de représentation. Allan Paivio (1969) proposait déjà une théorie similaire selon laquelle la représentation sémantique des mots se divisait en deux codes, un code linguistique/symbolique et un code pictural/analogique ; les concepts concrets sont représentés dans les deux codes, contrairement aux concepts abstraits, qui n’apparaissent que sous la forme d’un seul code (linguistique), ce qui expliquerait pourquoi les mots concrets sont plus facilement mémorisés que les mots abstraits. La plupart du temps, pour ces visions hybrides, les représentations ou simulations incarnées seraient utilisées dans des tâches comme l’imagerie mentale, nécessitant l’inspection explicite des propriétés sensori-motrices des objets. Le reste du temps, pour le traitement sémantique de mots, durant la lecture par

exemple, la cognition se baserait sur des symboles linguistiques moins coûteux à utiliser et moins long à activer.

3. Les arguments empiriques de la cognition incarnée : à quoi le voit-on qu'elle est incarnée ?

3.1. Les paradigmes d'amorçage

Depuis deux décennies, la recherche scientifique a su offrir un nombre grandissant de preuves empiriques confirmant les attentes de la cognition incarnée. Une majeure partie des études font usage de paradigmes d'amorçage pour arriver à ces fins. Ces paradigmes consistent à présenter une amorce suivie d'une cible afin d'observer la manière dont le traitement cognitif de la première a influencé le traitement de la seconde. La plupart du temps, les temps de réponse sont recueillis pour chaque couple amorce-cible et ils sont analysés de manière à détecter quel type d'amorce accélère le traitement de la cible. Par exemple, l'amorce "chat" peut faciliter le traitement de la cible "char" par rapport à l'amorce "pneu" (i.e., amorce orthographique).

Le travail de Rolf Zwaan en 2002 a été particulièrement influent. Dans une première expérience, lui et son équipe ont présenté 48 paires d'amorces-cibles à des volontaires. Les cibles étaient des images d'objets, e.g., un aigle ou un œuf, qui pouvaient prendre deux formes, e.g., les ailes déployées ou repliées pour l'aigle et dans sa coquille ou au plat pour l'œuf. Les amorces étaient des phrases. Les participants devaient lire ces phrases puis indiquer si l'image subséquemment présentée désignait un objet mentionné dans la phrase qu'ils venaient de lire. Il a été observé que les réponses étaient plus rapides lorsque les phrases étaient congruentes avec l'image cible comparé aux paires amorce-cible non-congruentes. Par exemple, lorsque la phrase-amorce mentionnait un œuf dans une poêle, les réponses étaient plus rapides si l'image présentée ensuite était un œuf au plat plutôt que si c'était un œuf dans sa coquille. Les auteurs en ont conclu que la compréhension des phrases avait impliqué de se représenter la forme des objets telle que suggérée par les phrases. Cet effet apparaît également dans leur seconde expérience où il était demandé aux participants de simplement nommer l'objet présent sur l'image-cible. Les auteurs ont considéré ces résultats comme étant en accord avec les prédictions du système de symboles perceptuels de Barsalou (1999) : la compréhension de phrases nécessiterait l'activation de symboles perceptuels représentant les mots, et non pas de symboles amodaux. Cette activation préparerait le système visuel à voir l'image ainsi activée, d'où la facilitation du traitement des images-cibles congruentes. Dix ans plus tard, Zwaan et Pecher (2012) ont répliqué ces résultats en ligne et sur un échantillon plus large et diversifié. Cela a été aussi l'occasion de répliquer d'autres effets d'amorçage comme l'amorçage de l'orientation et de la couleur qui vont eux aussi dans le sens d'une simulation visuelle des référents lors de la lecture de phrases.

3.2. L'apport essentiel des paradigmes d'interférence

3.2.1. Interférer avec les processus visuels

L'une des études les plus récentes appliquant ce paradigme avec succès est celle de Horchak et Garrido (2022). Lors de leur première expérience, les participants devaient écouter des phrases décrivant des scènes de nuit ou de jour de la forme "Le soleil/la lune brille sur l'objet x". Puis, 500 millisecondes plus tard, une image leur était présentée. Ils devaient alors indiquer si l'objet x mentionné dans la phrase apparaissait dans l'image. L'éclairage de l'image (soit faible et "froid" pour simuler un éclairage de nuit, soit plus intense et "chaud" comme la lumière du soleil) correspondait ou non avec celui mentionné dans la phrase précédente. De manière similaire aux études de Zwaan, les participants répondaient plus rapidement aux images avec un éclairage congruent avec celui impliqué dans les phrases, ce qui suggère que le traitement sémantique des phrases a nécessité une simulation mentale visuelle de la scène décrite, accompagnée de son éclairage de fond. Si ce dernier énoncé est vrai, alors l'inhibition de la simulation visuelle devrait faire disparaître la facilitation de la réponse pour les images congruentes. Pour tester cela, dans une deuxième expérience, les auteurs ont exposé les participants à du bruit visuel pendant l'écoute des phrases. Les paires de phrases-images congruentes n'étaient plus traitées plus rapidement que les paires non-congruentes : l'interférence visuelle a bel et bien perturbé la simulation visuelle supposée à l'origine des effets d'amorçage, ce que corrobore la littérature employant ce même type de bruit visuel (Edmiston & Lupyan, 2017 ; Ostarek & Huettig, 2017) et qui montre donc une implication des processus visuels dits de bas niveau. Les deux autres expériences de l'article montrent des résultats semblables pour le traitement de phrases écrites.

Comme l'ont fait Horchak et Garrido dans cette seconde étude, utiliser un paradigme d'interférence en complément d'un paradigme d'amorçage constitue une méthode puissante pour tester rigoureusement les hypothèses de la cognition incarnée. Ces derniers font partie de la catégorie des paradigmes dits causaux, puisqu'ils permettent de supprimer la cause supposée des résultats observés, et de constater la disparition des effets lorsque la cause n'est plus présente et par conséquent d'inférer que le processus impacté par l'interférence est bien la cause du phénomène observé. Les méthodes utilisant de l'interférence permettent de faire une "inférence forte" (Ostarek & Bottini, 2021), c'est-à-dire qu'elles permettent d'exclure les hypothèses amodalistes des interprétations possibles. La faiblesse des paradigmes d'amorçage tels qu'utilisés par Zwaan réside dans le fait que, *in fine*, les résultats peuvent être expliqués autant par la cognition incarnée que par les théories cognitivistes traditionnelles (bien que la cognition incarnée a tout de même l'avantage d'être a priori plus parcimonieuse). L'effet d'amorçage des travaux de Zwaan peut être interprété comme un amorçage conceptuel sous-tendu par des symboles amodaux : la forme des objets mentionnée dans les phrases ainsi que la forme des objets sur les images peuvent être extraits dans un format amodal et créer alors

un effet de congruence conceptuel sans activer de représentations visuelles. Mettre en place une interférence perceptive (de bas niveau, de type bruit visuel) comme dans Horchak et Garrido (2022) permet d'interférer avec les processus perceptifs sans impacter les processus conceptuels et donc d'attribuer sélectivement les effets d'amorçage à des processus perceptifs. Cette puissance des paradigmes d'interférence a par ailleurs motivé l'exploration des effets d'interférence dans le troisième article de cette thèse sur les concepts abstraits *Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts* dans le Chapitre 3.

En 2020, une autre expérience de Davis et collaborateurs avait produit des résultats convaincants avec une interférence visuelle de plus haut niveau. Pour chaque mot présenté, les participants avaient deux secondes pour prendre une décision sémantique (i.e., indiquer si le mot se référait à un animal ou non), et, en parallèle, retenir quatre formes géométriques sans lien apparent. Puis, 250 millisecondes plus tard, ils devaient indiquer si la cinquième figure qui leur était présentée faisait partie des quatre précédentes. Les mots variaient au niveau des expériences visuelles qui leur étaient rattachées : ils pouvaient être peu visuels comme "ambiance" ou très visuels comme "lune". L'interférence visuelle a ralenti les temps de décision sémantique par rapport aux essais sans interférence, et cet effet d'interférence était d'autant plus fort que les mots avaient un haut niveau d'expérience visuelle (tout en ayant évincé l'effet de la concrétude des mots).

3.2.2. Interférer avec les processus moteurs

Ces paradigmes d'interférence ont pu démontrer l'implication de processus moteurs dans le traitement sémantique. Onishi et collaborateurs (2022) ont présenté des paires de noms d'objets à des participants qui avaient pour tâche de juger quel objet était plus grand que l'autre, tout en ayant leurs mains libres ou immobilisées (sous un panneau transparent pour ne pas attribuer l'effet d'interférence au fait que les participants ne voient pas leurs mains). Les paires de mots étaient composées de mots se référant à des objets très manipulables (e.g., tasse, stylo) ou peu manipulables (e.g., escalier, pneus). Le fait d'avoir immobilisé les mains des participants a davantage ralenti les temps de réponse pour les mots manipulables que pour les non-manipulables. De manière cohérente, les mesures d'IRM fonctionnelle effectuées durant la tâche ont montré une baisse de l'activité cérébrale hémodynamique dans les réseaux sémantiques, en particulier dans le sillon intra-pariétal gauche. L'immobilisation des mains aurait donc agi comme une interférence motrice, empêchant les simulations mentales motrices essentielles au bon traitement sémantique.

L'article de Davis et collaborateurs (2020) présenté dans la section précédente 3.2.1 (p. 18), parvient au même effet d'interférence motrice. Leur deuxième expérience était structurée de manière identique à la première, à la différence que les mots variaient dans leur

degré d'expérience manuelle et la tâche d'interférence était motrice (i.e., exécuter une séquence de gestes pendant la décision sémantique). Le même pattern de résultats que dans leur première expérience s'observe : le traitement des mots subit un ralentissement dans la condition d'interférence manuelle qui est d'autant plus important qu'ils ont un haut niveau d'expérience manuelle.

Ces études convergent toutes vers une même conclusion : l'accès au sens du mot est fonction de la disponibilité des éléments visuels et moteurs impliqués dans sa représentation.

3.3. Les données en psycholinguistique

Depuis les travaux de Lakoff et Johnson, la psycholinguistique a entrepris des recueils de données plus systématiques auprès de volontaires. En effet, parallèlement aux études avec le paradigme d'amorçage, les mots manipulables faisaient également l'objet d'études en psycholinguistique. Les recherches dans ce domaine définissent les mots manipulables comme les mots ayant un haut score⁴ de *Body-Object Interaction* (BOI), l'aisance d'interaction physique avec le référent du mot. Les réponses de catégorisation sémantique sont plus rapides et correctes pour ces mots avec un haut BOI comparées à des mots avec un faible BOI (Siakaluk et al., 2008). Cet effet facilitateur du BOI témoigne encore une fois de l'importance des éléments moteurs dans la compréhension du langage. L'implication d'autres modalités sensorimotrices a pu être mise en évidence, comme la force perceptuelle associée au mot (à quel point un concept peut être expérimenté par l'ouïe, le goût, l'odorat, le toucher et la vision, Connell & Lynott, 2012) ou son niveau "d'incarnation" (le degré d'implication du corps humain associé à des verbes, sur une échelle de 1 à 7, Sidhu et al., 2014) qui ont un poids significatif dans les modèles explicatifs de la performance aux tâches sémantiques (en contrôlant l'effet des autres variables comme la concrétude ou l'imageabilité).

3.4. Les limites

Ces résultats, bien qu'a priori convaincants, doivent être néanmoins nuancés. La littérature scientifique a reporté à plusieurs reprises des cas de doubles dissociations entre les processus sensorimoteurs et les concepts sensorimoteurs, ce qui nous empêche de conclure définitivement que les simulations sont absolument essentielles pour le traitement sémantique. Malgré une atteinte à leurs processus sensorimoteurs, certains patients cérébro-lésés ne présentent pas de déficit au niveau des concepts se rapportant à des éléments

⁴ Ces scores sont établis par des études de normes dans lesquelles plusieurs sujets humains doivent noter, généralement sur une échelle de Likert, des mots (la plupart du temps, plusieurs centaines). Les scores moyens de chaque mot sont ensuite utilisés afin d'obtenir un matériel expérimental contrôlé pour des tâches utilisant des mots en guise de stimuli.

sensorimoteurs et inversement, ce qui est problématique car la cognition incarnée suppose que l'un dépend de l'autre. Bien que certaines études trouvent que les déficits moteurs dus à des contraintes biomécaniques congénitales (e.g., main manquante, déficit de force musculaire) augmentent les temps de réponses à des tâches cognitives censées reposer sur des simulations motrices, d'autres études montrent en revanche une préservation de la performance comparée à des sujets contrôles. Le même désaccord se retrouve dans la littérature sur les troubles moteurs acquis (e.g., Parkinson). De plus, la cécité congénitale ne produit pas systématiquement de déficit de traitement sémantique de concepts visuels⁵. Dans Bedny et collaborateurs (2019), pour une tâche de jugement de similarité sémantique sur des paires de mots, les personnes aveugles performaient aussi bien que les personnes non-aveugles, malgré la présence de paires de verbes liés à la lumière comme "étinceler-scintiller" dans les stimuli (donc a priori très fortement liés à la vision). Il en va de même pour les connaissances liées aux couleurs ; bien que des déficits soient parfois observés, certaines études montrent que les personnes aveugles sont capables d'identifier les couleurs se ressemblant (Saysani et al., 2018) ainsi que les fruits tendant à être de même couleur (Kim et al., 2019).

Pour répondre à ce phénomène de double dissociation, certains théoriciens se tournent vers les théories amodales, malgré tous les problèmes que posent les symboles amodaux comme vu dans la section 2 (p. 8). Pour Ostarek et Bottini (2021), la double dissociation prouve seulement que les simulations incarnées ne sont pas des mécanismes systématiquement recrutés pour le traitement sémantique. Ces simulations auraient au mieux un rôle fonctionnel, n'étant pas nécessaires mais utiles. Selon Barsalou (2016), ces effets de double dissociation n'infirmant pas pour autant l'existence de représentations conceptuelles multimodales abstraites qui peuvent être supportées par des zones de convergences malgré l'atteinte d'aires modal-spécifiques. La plupart des études sur ce phénomène, notamment celles sur les troubles moteurs, ne contrôlent pas les potentiels mécanismes compensatoires ou le recrutement d'autres modalités redondantes (e.g., de l'information motrice peut être dérivée de la perception du mouvement d'autrui, idem pour l'odorat et la goût) qui offriraient des moyens d'ancrage non détectés. On peut donc supposer que les individus avec des troubles moteurs peuvent utiliser des moyens détournés pour résoudre les tâches sans utiliser de simulations motrices, en compensant avec d'autres modalités non atteintes. Des concepts moteurs peuvent être en théorie compris en faisant appel à ses expériences visuelles produites

⁵ Les témoignages des personnes concernées peuvent être assez édifiants. Sur YouTube, on peut par exemple trouver une personne aveugle témoignant de ses difficultés à comprendre certains aspects du concept de transparence : "Je ne sais pas vraiment ce que signifie être capable de voir à travers les choses. Autrement dit, quand vous regardez quelque chose, voyez-vous la fenêtre et la chose ou vous voyez la fenêtre ?" (The Tommy Edison Experience, 2017, 0:42, <https://www.youtube.com/watch?v=UoyYSAAY3ks>)

par la perception des mouvements d'autrui. De la même manière, les personnes aveugles peuvent comprendre des concepts liés à lumière, comme celui d'intensité lumineuse, via d'autres modalités par lesquelles il est possible de ressentir de l'intensité (Ostarek & Bottini, 2021). Cette supposition est plus difficile à maintenir concernant les résultats liés au traitement sémantique des concepts de couleurs étant donné que le travail de compréhension peut difficilement être relégué à d'autres modalités que la modalité visuelle.

Le fait que l'altération des habiletés sensorimotrices ne conduisent pas nécessairement à un déficit au niveau du traitement sémantique peut être expliqué par d'autres théories en accord avec la cognition incarnée comme la théorie sensorielle/fonctionnelle (*Sensory/Functional Theory*, Vallet et al., 2011 ; Warrington & Shallice, 1984). Les patients atteints de démence sémantique souffrent de troubles dans le traitement du sens des mots faisant référence à des entités vivantes (e.g., lion), concepts liés directement à des aspects perceptifs, sans pour autant avoir des difficultés à comprendre d'autres concepts (e.g., les outils) et sans avoir de perturbations de leurs habiletés sensorimotrices qui auraient pu causer ces déficits sémantiques. Si les théories amodales se tournent vers une explication en terme d'atteinte spécifique des hubs sémantiques sous-tendus par le cortex temporal antérieur (impliquant donc une distinction nette entre processus sensorimoteurs et réseaux sémantiques), d'autres théories comme la théorie sensorielle/fonctionnelle proposent, données expérimentales chez l'humain et l'animal à l'appui, que le cortex temporal antérieur sous-tende en réalité l'intégration visuelle de haut niveau et l'intégration multisensorielle. L'atteinte de cette zone cérébrale chez ces patients ne serait donc pas un déficit dans un réseau conceptuel amodal mais un déficit d'intégration multimodale, provoquant une perturbation dans la compréhension de certains concepts directement liés à la perception (i.e., les items vivants), sans qu'il y ait une atteinte des régions sensorielles de plus bas niveau. Cette déduction de la théorie sensorielle/fonctionnelle est cohérente avec l'idée des zones de convergence mentionnée dans le paragraphe précédent.

3.5. La cognition incarnée dans de multiples domaines

Plusieurs domaines ont estimé pertinent d'aborder leur objet d'étude respectif sous un angle incarné. Tout d'abord, en psychologie du stress, Francis (2018) a proposé une théorie incarnée du stress selon laquelle le processus de catégorisation d'une situation comme stressante se fait sur la base de mécanismes d'intégration des informations provenant du corps, de l'environnement externe et de l'expérience antérieure. En parallèle, dans le champ du raisonnement mathématique, Landy et collaborateurs (2014) considèrent que la résolution de problèmes mathématiques, par exemple des équations, dépendrait plus de stratégies perceptivo-motrices de manipulation de symboles concrets plutôt que de manipulations abstraites de symboles amodaux. Par conséquent, l'apparence physique des notations

mathématiques, l'arrangement spatial des symboles mathématiques dans une équation, peuvent favoriser ou perturber le raisonnement formel sous-jacent. Très récemment, il a été également observé que, pour le raisonnement spatial, l'imagerie motrice favorisait la résolution de problèmes spatiaux (Ianì et al., 2023). Concernant le raisonnement de manière générale et la prise de décision, le travail d'Antonio Damasio (1996) sur l'hypothèse des marqueurs somatiques a été particulièrement influent. Cette hypothèse implique qu'un raisonnement rationnel est dépendant de la capacité de la cognition à utiliser l'état du corps, notamment ses émotions, pour marquer positivement ou négativement des événements. Dans le champ du jugement moral, il a été montré que la tendance à imaginer visuellement les conséquences des dilemmes moraux influençait les jugements moraux faits par les participants (Amit & Greene, 2012). Concernant les rêves, il s'avère que l'activité cérébrale durant le sommeil implique des réseaux neuronaux engagés dans la perception visuelle pendant l'éveil, Horikawa et al., 2013). D'autre part, l'étude des mécanismes de prédiction de stimulus à venir prouve que l'attente d'un stimulus visuel spécifique active le cortex visuel primaire associé à la perception réelle de ce même stimulus (Kok et al., 2014). De manière similaire, prévoir un futur plus ou moins lointain se base sur l'extraction et la recombinaison d'informations épisodiques stockées en mémoire à long-terme afin de créer une simulation d'un nouvel événement (Schacter et al., 2007).

4. Cognition incarnée et simulations mentales

4.1. Des simulations pour ancrer la cognition

Le paradigme de la cognition incarnée regroupe plusieurs théories. Une des manières de considérer la cognition comme incarnée consiste à s'appuyer sur la notion de simulations mentales. Lorsque nous interagissons avec le monde, notre système nerveux garde une trace des états perceptifs, moteurs et introspectifs (e.g., affects, motivations) créés par cette expérience. Le système cognitif réactiverait ces états pour représenter notamment la connaissance (Barsalou, 2008). Interagir avec des chats crée des expériences perceptives (nous voyons l'aspect visuel des chats, nous les entendons ronronner, nous sentons la douceur de leurs poils sous nos doigts), motrices (nous exécutons l'action de les caresser) et introspectives (nous trouvons ce moment agréable et relaxant). Plus tard, en lisant un texte écrit contenant le mot "chat", notre système conceptuel va se baser sur ces expériences multimodales pour donner du sens à ce mot. Par conséquent, comprendre le langage nécessiterait de simuler nos expériences sensorimotrices vécues auxquelles il fait référence.

Le concept de simulation mentale aurait émergé de la philosophie à partir de la fin du XIX^{ème} siècle pour expliquer les mécanismes sous-jacents de l'empathie et de la sympathie. C'est dans les années 1980 que ce concept a été repris par la psychologie moderne afin de constituer un champ théorique à part entière concernant les processus impliqués dans la théorie de l'esprit : on comprend les intentions d'autrui, ses états mentaux en se mettant "dans ses chaussures", en recréant ses états mentaux (Barlassina & Gordon, 2017).

Cette notion de simulation s'est d'abord développée sans lien explicite avec la cognition incarnée mais est maintenant couramment associée avec cette dernière. Ainsi Gallese et Sinigaglia (2011) définissent une simulation mentale comme une réutilisation de son propre état corporel pour comprendre les états sensoriels, moteurs et émotionnels d'autrui. Attribuer une intention d'action spécifique à autrui (e.g., attraper quelque chose) nécessite de soi-même activer cette intention motrice et donc d'utiliser les aires cérébrales impliquées dans la formation de ses propres intentions. Ces simulations sont dans un format "corporel" et non propositionnel, ce qui, par conséquent, contraint ce qu'est capable d'accomplir une simulation mentale. Notre capacité à "lire" autrui est limitée car nous sommes contraints de nous servir uniquement de nos systèmes sensorimoteurs, tributaire de nos limites physiques.

La découverte par l'équipe de Rizzolati (di Pellegrino et al., 1991) des neurones miroirs a favorisé la mise en avant de la théorie des simulations sur la scène scientifique. Ces neurones, se trouvant notamment dans l'aire prémotrice ventrale, le lobule pariétal inférieur et l'aire motrice primaire, ont la particularité de s'activer lorsque nous exécutons une action mais également lorsque nous observons autrui faire cette même action. L'existence de telles cellules suggère que notre habileté à percevoir et interpréter les actions des autres nécessiteraient

l'implication de notre propre système moteur (Kilner & Lemon, 2013), soit, une simulation motrice.

Pour notre travail de thèse, nous préférons une définition moins limitée au champ de la cognition sociale. Les simulations peuvent être envisagées comme des formes faibles de perception et d'action. Une simulation motrice consiste en un déroulement de la chaîne de processus normalement engagée dans l'exécution d'un mouvement, mais qui est interrompue avant la production effective de celui-ci. De la même manière, une simulation perceptive recrute les mêmes processus impliqués dans la perception réelle d'un stimulus sans que celui-ci soit néanmoins présent. Ceci se traduit notamment par une superposition entre le système nerveux impliqué dans la perception et l'action et celui impliqué dans ces simulations (Hesslow, 2012).

Ce concept de simulation est d'autant plus intéressant qu'il se situe au carrefour de plusieurs champs des sciences cognitives, dans la mesure où des chercheurs appartenant à des champs de recherche différents ont consensuellement considéré ce concept comme pertinent pour expliquer les processus qui constituaient l'objet de leurs recherches. Que ce soit dans les neurosciences de la cognition sociale (Gallese & Sinigaglia, 2011), les recherches sur l'imagerie mentale (Moulton & Kosslyn, 2009) ou l'étude du traitement conceptuel (Barsalou, 2008), les simulations mentales ont obtenu une place de choix au coeur des modèles théoriques.

4.2. Différents types de simulations

Ces simulations peuvent être catégorisées en deux types :

- Des simulations de bas niveau : inconscientes, automatiques, stimulus-dépendantes : elles sont caractéristiques des mécanismes miroirs (e.g., percevoir des actions active automatiquement une simulation de cette même action chez l'individu percevant) ;
- Des simulations de haut niveau, conscientes, volontaires, stimulus-indépendantes : dans ce cas, elles sont caractéristiques de l'imagerie mentale (visualiser des images, des actions, des intentions).

Il est postulé que ces simulations sont dans le même format que les processus qu'elles simulent (i.e., une simulation visuelle produit une expérience visuelle semblable à de la véritable perception visuelle) et qu'elles réutilisent les mécanismes à la base de ces processus (i.e., une simulation visuelle se base sur les mêmes mécanismes utilisés pour voir, Barlassina & Gordon, 2017).

L'imagerie mentale peut donc être considérée comme une simulation. Elle est vue comme une instance consciente d'un mécanisme qui, dans les autres cas, est un mécanisme inconscient et déclenché rapidement pour le traitement sémantique (Barsalou, 2008). Il est par conséquent très important de garder à l'esprit que *la simulation n'est pas synonyme d'imagerie mentale*. Les approches simulationnistes de la cognition ne postulent pas du tout

que tous les processus, notamment de compréhension du langage, débouchent sur des expériences sensorimotrices conscientes. Dans le cas contraire, ceci consisterait à affirmer que la compréhension de la moindre information linguistique déclencherait des expériences conscientes multimodales en continu, qui se superposeraient aux perceptions présentes et entreraient grandement en concurrence avec ces dernières, de sorte qu'il soit quasiment impossible d'interagir efficacement avec notre environnement tout en étant exposé à du langage. Ceci est évidemment démenti par notre expérience subjective directe.

4.3. Des simulations situées

Si les simulations sont incarnées, dans le sens où elles sont de même nature que les activités perceptives et motrices, selon des auteurs comme Barsalou, elles sont également situées. D'après ce dernier, la cognition en général serait régie par ce qu'il décrit comme un cycle de l'action située (2020). Percevoir des objets ou événements dans l'environnement déclencherait une chaîne de processus cognitifs comprenant l'évaluation de la pertinence de l'entité pour l'individu (la relation avec ses buts, ses valeurs, son identité et les normes sociales), ce qui peut engendrer des affects (e.g., émotions et motivations) et des actions (e.g., mouvements oculaires, actions corporelles) qui ont des conséquences sur le monde extérieur (e.g., récompense, punition) ou intérieur (e.g., erreur de prédiction) pouvant provoquer alors la réitération de cette chaîne. Une trace du déroulé de ces processus est laissée en mémoire et est réactivée lors de l'interaction ultérieure avec ces mêmes entités à l'origine du déclenchement de la chaîne. Cette trace serait stockée sous la forme d'une "conceptualisation située" qui intègre les différents éléments situationnels du cycle et serait ensuite réutilisée pour expliquer les situations actuelles, prédire les événements de l'environnement ou produire des actions visant des résultats spécifiques ou encore comprendre le langage. Ainsi, le traitement sémantique des concepts nécessiterait la simulation de situations s'organisant suivant le cycle de l'action située. La compréhension de mots comme "marteau" pourrait nécessiter la simulation d'un arrière-plan contextuel, un cadre composé d'un environnement (e.g., garage), des autres outils souvent présents aux côtés de cet objet, des actions associées (e.g., marteler), les buts pertinents (e.g., enfoncer un clou dans un mur), d'affects liés à la mise en place de l'action (e.g., anxiété à l'idée de se taper sur les doigts).

4.4. Une cognition incarnée sans simulations ?

D'autres versions de la cognition incarnée existent, notamment des visions qui n'utilisent pas le concept de simulations comme les approches énoncées dans la sous-partie 2.6 "Plusieurs visions incarnées". Malgré la position de notre travail de thèse en faveur de la théorie des simulations, le premier article de la thèse *Embodied mental imagery improves memory*, présenté dans le Chapitre 1, considère d'autres théories pour interpréter

les résultats. Pour éviter la redondance, nous n'allons pas détailler ces théories ici, mais notons tout de même que leurs prédictions restent cohérentes avec une vision simulationniste en ce qui concerne le lien entre imagerie mentale et mémoire exploré tout au long de cette thèse.

5. Cognition incarnée et imagerie mentale

5.1. Qu'est-ce que l'imagerie mentale ?

Comme mentionné ci-dessus, le phénomène d'imagerie mentale représente la partie émergée du processus de simulation mentale. Elle peut être définie comme une expérience conscience quasi-perceptive qui émerge en l'absence du stimulus physique qui la cause en temps normal (Thomas, 2014). Cette imagerie peut concerner en théorie toutes les modalités sensorielles. Elle peut être notamment visuelle (c'est cette forme qui est la plus souvent investiguée). C'est ce phénomène que nous expérimentons quand nous imaginons des formes, des couleurs (parfois appelé "imagerie d'objet") ou des relations spatiales ("imagerie spatiale"). Elle peut être également motrice auquel cas elle est définie comme étant la reproduction mentale d'une activité physique sans mouvement réel (Driskell, 1994). Cette dernière est parfois appelée "imagerie kinesthésique" ou "proprioceptive" car durant l'imagerie motrice, "on fait l'expérience des sensations corporelles et non des commandes motrices en elles-mêmes" (Moulton & Kosslyn, p.1273). Cependant, dans cette thèse, nous continuerons à l'appeler "imagerie motrice" car c'est l'appellation la plus répandue dans la littérature scientifique et elle met l'accent sur un aspect important pour le fonctionnement cognitif selon la cognition incarnée : l'action. De l'imagerie gustative et olfactive est aussi possible et une expertise peut même être développée dans ce domaine (par exemple chez les experts en vin, Croijmans et al., 2020).

Bien que les introspectionnistes aient manifesté un grand intérêt pour le phénomène d'imagerie mentale au début du siècle dernier, il a perdu de sa pertinence pendant la période du behaviorisme jusqu'aux années 1960, lorsque le domaine a connu un regain d'intérêt grâce à l'émergence de la révolution cognitive. Cette nouvelle vague d'attrait a été accompagnée de vifs débats concernant le *format* de l'imagerie mentale. Ces débats ont opposé une perspective analogue, en phase avec la cognition incarnée, à une perspective propositionnelle, qui s'alignait avec le cognitivisme computationnel décrit précédemment dans la partie 1. Ce débat a permis de fournir des arguments au courant de la cognition incarnée qui a émergé plus tardivement. Alors que les cognitivistes traditionnels soutenaient que l'imagerie mentale reposait sur des processus symboliques/linguistiques et que l'expérience sensorielle qui en résultait n'était qu'épiphénoménale (voir la sous-partie 1.2 sur l'impénétrabilité modulaire et l'imagerie mentale comme épiphénomène), d'autres scientifiques ont apporté des contre-arguments empiriques intéressants.

5.2. L'imagerie mentale comme simulation incarnée

Les premiers à explicitement considérer l'imagerie mentale comme simulation perceptive et à en faire un article scientifique entièrement dédié ont sans doute été Moulton et Kosslyn en 2009. Selon ces derniers, l'imagerie mentale a pour fonction de générer des

prédictions sur la base d'expériences passées : si vous imaginez un point, il sera sûrement noir, parce que la majorité des points des documents que nous lisons sont noirs. Vous avez donc fait une prédiction (l'image du point) sur la base d'expériences passées (les points de la majorité des documents que vous avez lus). L'imagerie peut également être utile pour se préparer au mieux à un futur plus ou moins proche et plus ou moins hypothétique. Cette fonction de prédiction serait le plus plausiblement prise en charge par un mécanisme similaire à la perception réelle. Le meilleur moyen de prédire la forme des oreilles d'un chat est encore de simuler le fait de voir des oreilles de chat. Par conséquent, ces simulations mentales mettent à disposition ou génèrent de la connaissance : je peux répondre à la question "le son d'une sirène de police a-t-il une hauteur constante ?" grâce à de l'imagerie mentale.

Toujours selon Moulton et Kosslyn (2009), la mise en place de l'imagerie mentale nécessiterait la participation combinée de la mémoire à long-terme, la mémoire de travail et du contrôle exécutif. Plus précisément, le phénomène d'imagerie mentale nécessite 1) l'encodage et le stockage d'informations épisodiques ; 2) la mise à disposition de ces informations en mémoire de travail ; 3) l'association à un contenu nouveau et l'activation de réponses émotionnelles et physiologiques ; 4) décider de la manipulation ou de l'arrêt de l'imagerie (e. g., pour savoir si une blague est adaptée à votre mariage, il faut 1) récupérer les souvenirs des mariages passés ; 2) "placer" en mémoire de travail une image auditive et visuelle de vous en train de faire une blague à la mariée ; 3) imaginer la réaction négative de la mariée et ressentir de l'embarras ; 4) re-imaginer la scène avec une autre blague).

5.3. Les preuves de l'ancrage multimodal de l'imagerie mentale

En ce qui concerne les mesures comportementales, on peut citer le travail fondamental de Shepard et Metzler en 1971 qui ont utilisé une tâche de rotation mentale. Cette tâche consistait à comparer une figure géométrique en trois dimensions à une autre figure cible (potentiellement la même) avec une orientation spatiale différente. Au cours de 1600 essais, les participants devaient indiquer si les deux figures étaient similaires. Ces chercheurs ont montré que le temps de jugement était relié de manière linéaire à la différence d'angle entre la figure de départ et la figure cible. Ceci suggère que les participants ont résolu la tâche à l'aide d'une rotation mentale et donc d'un processus dans un format analogue et non un calcul symbolique. Kosslyn et ses collègues ont utilisé les temps de réponses de manière similaire en 1978 pour montrer le format pictural du scanning mental (i.e., parcourir des distances mentalement).

Toujours du côté des mesures comportementales, des preuves plus récentes ont été fournies par le paradigme de rivalité binoculaire (Keogh & Pearson 2018 ; Pearson et al., 2011). Ce protocole de rivalité binoculaire consiste à présenter deux images différentes à chaque œil (en général, une verte et une rouge). Le système visuel ne pouvant traiter qu'une seule image

à la fois, un phénomène de perception bistable se met en place : la perception consciente des participants alterne entre le stimulus rouge, le stimulus vert et un mélange/superposition des deux. Le stimulus que les participants voient le plus à un temps t est dit dominant. L'équipe de Joel Pearson a pu montrer que le fait d'imaginer un des deux stimuli avant qu'il soit présenté favorise la dominance du stimulus congruent avec celui imaginé. Par exemple, s'il est demandé aux participants d'imaginer le stimulus vert au préalable, ils auront plus de chances de voir le stimulus vert plutôt que le rouge lorsqu'on leur présente réellement les deux stimuli en rivalité binoculaire. Ce type de résultats semble révéler que l'imagerie mentale d'un stimulus prépare la perception réelle de ce dernier et que, par conséquent, l'imagerie mentale est de même nature que la perception visuelle.

Outre les mesures comportementales, les indices neurophysiologiques semblent aller dans le même sens. Dans une expérience de Schendan et collaborateurs en 2012, des participants avaient à imaginer des visages ou des objets. Une fois l'image demandée en tête, une image congruente (visage → visage ou objet → objet) ou non (visage → objet ou objet → visage) était présentée, à la manière d'un paradigme d'amorçage similaire au travail de Pearson présenté ci-dessus, à l'exception du fait qu'aucune réponse particulière n'était attendue de la part des participants. Des mesures électro-encéphalographiques ont montré qu'en situation congruente, la réponse cérébrale (notamment la catégorisation perceptive) était facilitée par l'imagerie mentale. Autrement dit, imaginer en amont un visage prépare le système visuel à voir effectivement un visage, et ce, de la même manière que si un visage avait vraiment été présenté en amont ; le même phénomène a d'ailleurs été observé pour les objets. D'autres études montrent les relations précises entre le type d'imagerie et le type d'aire modale-spécifique recrutée : l'imagerie visuelle active le cortex visuel (Kosslyn & Thompson, 2003), l'imagerie auditive le cortex auditive (Zatorre et al., 1996), l'imagerie motrice le cortex moteur (en particulier, le cortex moteur primaire, le cortex prémoteur, le cervelet et le cortex somatosensoriel, tous impliqués dans l'action réelle, Cummings & Williams, 2012) et l'imagerie gustative le cortex gustatif (Kobayashi et al., 2004).

Si l'idée des simulations incarnées comme base à l'imagerie mentale paraît plausible, qu'en est-t-il d'autres processus aussi fondamentaux que la mémoire ?

6. Cognition incarnée et mémoire

6.1. La récupération mnésique comme reviviscence des expériences sensorimotrices passées

Bien que la majorité de la littérature scientifique sur la cognition incarnée porte sur le langage, le traitement conceptuel ou la représentation des connaissances, des indications supplémentaires suggèrent que la mémoire semble reposer sur des simulations sensorimotrices. La revue de Francesco Iani (2019) dresse un état de l'art impressionnant sur la question et montre que, d'une part, la recréation, au moment de la récupération, des processus en jeu lors de l'encodage facilite ladite récupération et d'autre part, activer les éléments sensorimoteurs d'un évènement précédemment encodé facilite également le processus de récupération, ce qui signifie que la mémoire repose sur la simulation de ces éléments cruciaux.

Un résumé de cette revue ainsi que d'autres travaux allant dans le même sens peuvent être trouvés dans l'introduction du troisième article de notre travail de thèse *Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts*. Pour éviter trop de redondance, nous n'allons présenter qu'un nombre limité de travaux.

6.2. Les preuves d'une mémoire incarnée

Pour être bref, la récupération mnésique nécessite la reviviscence au niveau perceptif, moteur et introspectif de l'expérience d'encodage.

6.2.1. Agir sur l'encodage des caractéristiques sensorimotrices des stimuli impacte leur récupération ultérieure

Outre ces effets de superposition entre récupération et encodage, les aspects moteurs ont une part particulièrement importante à jouer dans la mémoire (e.g., Downing-Doucet & Guérard, 2014 ; Dutriaux & Gyselinck, 2016 ; Guérard & Lagacé, 2014) : des paires d'images d'objets sont mieux retenues si elles évoquent une action (e.g., une bouteille au-dessus d'un verre versus une bouteille et un verre dans un arrangement spatial incongruent, Guérard et al., 2015) et des verbes d'action sont mieux mémorisés si les participants exécutent les gestes décrits par les verbes plutôt que s'ils ne font que simplement les lire (Engelkamp, 1991). Avant l'étude d'Onishi et collaborateurs (2022) sur l'interférence motrice présentée dans la sous-partie 3.2.2, Dutriaux et Gyselinck (2016) avaient utilisé un procédé d'interférence motrice similaire afin de perturber le rappel d'informations motrices : le fait d'immobiliser les mains des participants dans le dos au moment de l'apprentissage de mots ou d'images manipulables rend moins probable leur rappel ultérieur que dans des conditions où les mains sont libres. Ce

phénomène n'est pas observé pour les stimuli non-manipulables. Ce rôle facilitateur des composantes motrices se retrouve également au niveau de l'apprentissage des langues (Macedonia et al., 2020). En résumé, ces phénomènes suggèrent fortement que, comme l'a dit Arthur Glenberg (1997, p.5), "la mémoire est spécialisée dans l'information incarnée".

6.2.2. Agir sur la récupération des caractéristiques sensorimotrices des stimuli impacte leur récupération effective

La récupération mnésique d'un objet précédemment inspecté visuellement nécessite la recréation du parcours visuel tel que démontré par des mesures de suivi oculomoteur (cette récupération est favorisée par la proximité des mouvements oculaires entre apprentissage et rappel et elle est détériorée par l'inhibition de ces mouvements, Laeng et al., 2014). Le même pattern s'observe avec la posture corporelle, qui facilite le rappel si elle est recréée au moment de la récupération (Dijkstra et al., 2007). L'état émotionnel peut également influencer la récupération. Ainsi, l'expression faciale adoptée lors du rappel d'un événement négatif peut affecter la reviviscence émotionnelle de ce dernier, et atténuer la négativité de l'événement si les participants sourient (Arminjon et al., 2015).

Witt et collaborateurs (2010) ont fait apprendre des images d'objets saisissables (outils) ou non (animaux) dont la partie saisissable était orientée vers une main libre du participant ou son autre main "occupée" par la prégnation d'un objet. Dans une tâche de reconnaissance ultérieure, les participants mettaient plus de temps à reconnaître les objets saisissables lorsqu'ils avaient été appris en étant orientés vers leur main occupée. Avec une procédure similaire, Brouillet et collaborateurs, (2016) ont montré que, lors de la phase de reconnaissance, les objets saisissables étaient plus facilement reconnus lorsque, au moment du test de reconnaissance, leur partie saisissable était orientée vers la touche de réponse "oui". Ceci implique que l'action de saisir a été encodée au moment de l'apprentissage, et que la compatibilité entre l'orientation de l'objet et la touche "oui" a créé une potentialité d'action sur l'objet qui a fait, par conséquent, ré-émerger ces aspect moteurs activés au moment de l'apprentissage et donc favoriser la remémoration de l'objet.

6.2.3. Le déroulement des processus mnésiques incarnés

Certains travaux ont exploré avec précision le décours temporel de l'activation et de l'intégration des composantes sensorimotrices des traces mnésiques. Par exemple, selon le modèle Act-In (Versace et al., 2014), présenté à l'occasion de la discussion sur la différence entre abstraction et amodalité dans la sous-partie 2.5, la récupération d'une connaissance conceptuelle sur un objet se ferait en deux temps, d'abord une activation inter-trace, puis un processus d'intégration multi-composants. Cette hypothèse se base sur de multiples données

expérimentales (Brunel et al., 2010 ; Labeye et al., 2008 ; Labeye & Versace, 2007). Labeye et Versace (2007) ont montré que certains effets d'amorce n'existaient que lorsque l'amorce était présentée pendant au moins 500 millisecondes et non lorsque la présentation ne durait que 100 millisecondes. Ce n'est qu'au bout de 500 ms que les connaissances apprises en phase d'apprentissage sont récupérées sous une forme conceptuelle "unifiée" (phase d'intégration multi-composants du modèle Act-In). En seulement 100 ms, l'amorce n'a le temps d'activer que des propriétés individuelles (activation inter-trace), ce qui implique que l'émergence des connaissances ne se fait pas de manière unifiée.

6.2.4. *L'importance des aires cérébrales sensorimotrices dans la mémoire*

Les mesures neurophysiologiques attestent également que ces aspects sensorimoteurs sont bel et bien réactivés pour récupérer la trace mnésique, tant au niveau du cortex cérébral que du système nerveux périphérique. Une revue de Danker & Anderson (2010) répertorie des études démontrant une superposition entre l'activité cérébrale à l'encodage et celle à la récupération, ce qui va dans le sens d'une récupération équivalente à une simulation des états de l'encodage. Plus précisément, le rappel de stimuli précédemment associés avec des images, des sons ou des odeurs réactive respectivement les cortex visuel, auditif ou olfactif spécifiquement engagés dans l'encodage. Pour le cortex visuel, des études plus précises montrent une réactivation de la voie ventrale occipito-temporale (la voie du "quoi", engagée dans la perception visuelle d'objets) lors de la récupération d'objets, et de la voie dorsale occipito-pariétale (la voie du "où", responsable du traitement de l'emplacement des objets) pour la récupération d'informations spatiales. Plus récemment, Garagnani et al. (2021) ont fait apprendre pendant trois jours 64 mots vides de sens (e.g., "Shruba") en les associant avec des actions ou des objets familiers. Le quatrième jour, lors de l'écoute de ces mots, les données recueillies en IRMf témoignent d'une activation du cortex visuel primaire et secondaire pour accéder au sens des mots nouvellement appris. La même année, Repetto et collaborateurs (2021) ont montré que l'activation des systèmes sensorimoteurs sur le plan neurophysiologique pouvait s'étendre jusqu'au système nerveux périphérique, étant donné qu'il existe une réponse électromyographique dans les avant-bras lors de la reconnaissance de mots appris avec des gestes.

7. Problématique : Cognition incarnée, mémoire et imagerie mentale

7.1. De l'imagerie mentale pour mieux mémoriser ?

Si l'imagerie mentale est une simulation sensorimotrice et que la récupération mnésique repose elle aussi sur ce même mécanisme, il est possible de se demander si l'utilisation de l'imagerie mentale en tant que stratégie de mémorisation détient la capacité de maximiser les chances de récupération d'une trace. À partir des années 1970, l'impact de l'imagerie mentale sur la mémoire a suscité un intérêt croissant (e.g., Bower, 1972 ; Gupton & Frincke, 1970 ; Mueller & Jablonski, 1970 ; Paivio, 1971). Pour illustrer les protocoles typiquement utilisés à cette époque, nous pouvons prendre l'exemple de Gupton et Frincke (1970) qui ont fait apprendre une liste de 12 paires de mots à des étudiants. Les mots composant la paire étaient faiblement ou hautement imageables. Certains participants avaient pour instructions de penser à une image appropriée à chaque paire de mots, les autres n'avaient aucune instruction. La performance de rappel a montré d'une part que les instructions d'imagerie mentale ont causé plus de rappels libres comparé à la condition sans instruction, mais seulement pour les paires imageables. D'autre part, les paires hautement imageables étaient mieux retenues que les autres, quelles que soient les conditions d'instruction. Il semblerait donc que l'imagerie mentale ait eu un effet bénéfique sur la performance de rappel, et les participants ont spontanément imaginé les paires imageables même sans instruction explicite d'imagerie mentale. Des études plus récentes montrent des résultats similaires concernant l'augmentation des rappels et reconnaissances correctes (e.g., Maraver et al., 2021 ; McCauley et al., 1996 ; Oliver et al., 2016 ; Pressley & Brewster, 1990).

L'effet bénéfique de l'imagerie mentale a pu également s'observer sur l'émergence de faux souvenirs (Foley, 2012 ; Foley et al., 2006 ; Foley et al., 2009 ; Maraver et al., 2021 ; Robin & Mahé, 2015). Pour étudier ce phénomène, la plupart de ces études ont utilisé un paradigme Deese-Roediger-McDermott (DRM) qui consistait à faire mémoriser 16 listes de mots très associés entre eux autour d'un thème (e.g., le thème "pain", le thème "chaise", le thème "fruit") sans que le nom de ce thème ne soit réellement présenté dans les listes. Ce mot constitue le "leurre critique" qui a de grandes probabilités d'être faussement et spontanément rappelé/reconnu. Foley et collaborateurs (2006) ont ainsi utilisé ce protocole. Dans leur première expérience, pour chaque mot, les différents groupes de participants devaient soit décrire une fonction de l'objet, soit générer une image mentale et décrire une fonction, soit générer une image qui se rapportait à leur vie personnelle puis décrire une fonction de l'objet. Les participants devaient ensuite reconnaître les mots réellement présentés parmi un ensemble de leurres. Les deux groupes d'imagerie étaient les plus efficaces pour reconnaître

les anciens mots : environ 95% de bonnes reconnaissances contre 78% pour le groupe qui avait seulement à décrire une fonction. Le résultat sans doute le plus intéressant se trouve au niveau des fausses reconnaissances : là où le groupe "fonction" avait considéré 61% du temps en moyenne un leurre critique comme présent dans les listes, il n'y avait qu'entre 10 et 23% de fausses reconnaissances en moyenne dans les groupes d'imagerie. Au cours de leurs différents recueils de données, l'équipe de Foley a, de manière récurrente, interprété ses résultats à l'aide d'hypothèses comme celle de l'appauvrissement de l'encodage relationnel ou celle de l'heuristique de distinctivité. Selon l'hypothèse de l'appauvrissement de l'encodage relationnel, encoder les mots avec de l'imagerie limiterait la diffusion d'activation à des concepts reliés lors du traitement du mot à mémoriser. Dans les conditions sans imagerie, le traitement des mots provoquerait plus de diffusion d'activation aux voisins sémantiques, ce qui aurait plus de chances de provoquer des fausses reconnaissances de mots fortement reliés en phase de reconnaissance. L'hypothèse de l'heuristique de distinctivité place la cause des effets d'imagerie plutôt au niveau de la récupération : les mots mémorisés avec l'imagerie sont mieux reconnus car les participants mettraient en place un raisonnement qui n'apparaît pas dans les autres conditions. Cette heuristique peut être formulée de la manière suivante : "si j'arrive à associer une image détaillée, distinctive à un mot lors du test de reconnaissance, alors je peux en déduire que l'image a été créée lors de la phase d'encodage de l'expérience". Ceci permettrait de distinguer plus facilement les mots anciens des mots nouveaux.

7.2. Des failles dans la littérature

Une première limite de cette littérature est que les conditions expérimentales d'imagerie utilisées dans les expériences sont la plupart du temps visuelles, mettant de ce fait de côté le rôle d'autres aspects sensorimoteurs. En effet, comme nous l'avons vu tout au long de la partie théorique de cette thèse, la cognition et la mémoire peuvent s'ancrer dans des expériences visuelles mais également motrices et introspectives (Barsalou, 2008). En particulier, le rôle de l'action semble fondamental, non seulement pour le traitement du langage, mais également pour la mémoire. Comme discuté dans la section 6.2.1, manipuler expérimentalement l'accès aux caractéristiques motrices des objets à apprendre impacte la récupération ultérieure de ces derniers (e.g., Dutriaux & Gyselinck ; Guérard et al., 2015). Une telle manipulation sur les indices moteurs et posturaux au moment de la récupération-même a un effet similaire (e.g., Brouillet et al, 2016 ; Dijkstra et al., 2007 ; Witt et al., 2010). Les études sur l'imagerie (présentées en section 7) portent sur la mémorisation de mots, or la compréhension du langage repose également sur l'activation d'éléments moteurs tel qu'en témoignent le rôle du Body-Object-Interaction en psycholinguistique (section 3.3) et les paradigmes d'interférence (Onishi et al., 2022, section 3.2.2). Ce qui signifie que la récupération de connaissances conceptuelles en mémoire est incarnée, au même titre que la

récupération d'épisodes créés durant la phase d'apprentissage d'une expérience. De manière générale, pour des raisons théoriques (partie 2) et empiriques (partie 3), le paradigme de la cognition et ses différentes déclinaisons théoriques considèrent le rôle de l'expérience corporelle comme centrale dans la cognition. Considérant l'ensemble de ces éléments théoriques soulignant l'importance des aspects moteurs dans les processus cognitifs et mnésiques, il semble nécessaire d'investiguer l'impact d'une imagerie impliquant des aspects moteurs sur les processus de mémorisation.

Une seconde limite est l'absence de mise en lien entre les résultats de expériences portant sur l'imagerie mentale dans la mémorisation, et la description incarnée du format des processus mnésiques. La littérature sur l'imagerie mentale constate que le fait d'orienter les processus d'encodage vers les caractéristiques visuelles des objets à apprendre, via des consignes d'imagerie mentale, améliore la mémorisation de ces derniers par rapport à des conditions expérimentales sans imagerie. Cette efficacité de l'imagerie mentale peut être expliquée par le fait que la récupération se base sur des indices sensorimoteurs (ici, au moins visuels) pour faire émerger la trace mnésique, comme vu dans la partie 6. En utilisant un argumentaire basé sur des hypothèses comme celles de l'appauvrissement de l'encodage relationnel ou l'heuristique de distinctivité (décrites en section 7.1), les études sur l'imagerie mentale axent leurs interprétations sur les calculs dans les réseaux sémantiques ou le raisonnement logique, ce qui les rend perméables aux approches amodales qui ont elles-mêmes des limites comme le problème d'ancrage des symboles (exposé en section 2.1), de transduction, de redondance ou de parcimonie (section 2.3). Ces études ignorent, de ce fait, les hypothèses incarnées portant sur le format des processus mnésiques.

7.3. Objectif et hypothèses de la thèse

Au regard de la revue scientifique présentée dans la partie théorique de cette thèse et des limites évoquées précédemment, l'objectif de notre travail de thèse a été de formuler des prédictions à partir de la cognition incarnée sur le déroulement optimal des processus de mémoire. En retour, ces prédictions ont visé à participer à la confirmation de la nature incarnée des processus mnésiques. En effet, la validité de la description incarnée de la mémoire peut être renforcée par le fait de montrer que la mémorisation est favorisée lorsque l'on centre explicitement l'encodage sur les aspects sensorimoteurs et introspectifs d'un item à mémoriser via des consignes d'imagerie mentale.

Le raisonnement général de la thèse est donc le suivant :

- 1) *Les simulations sensorimotrices sont essentielles au bon déroulement des processus d'encodage et de récupération.* Comme vu dans la partie 6, faciliter l'activation des éléments sensorimoteurs associés aux items à mémoriser, que ce soit au moment de l'encodage ou de la récupération, favorise le rappel efficace des items (e.g., Dutriaux &

Gyselinck, 2016 ; Engelkamp, 1991 ; Guérard et al., 2015 ; Macedonia et al., 2020 ; Witt et al., 2010). Les éléments sensori-moteurs sont donc des indices de récupération privilégiés.

- 2) *L'imagerie mentale est une forme de simulation.* Dans la partie 5, nous avons exposé le fait que l'imagerie mentale reposait sur des processus analogues aux processus engagés durant la perception et l'action. Plus précisément, ces processus d'imagerie mentale se basent sur un mécanisme de simulation tel que décrit dans la partie 4, c'est-à-dire un processus de réactivation du système nerveux engagé dans la perception et l'action effectives (e.g., Barsalou, 2008 ; Hesslow, 2012).
- 3) *L'imagerie mentale peut être utilisée pour activer sélectivement et explicitement des éléments sensorimoteurs à l'encodage.* En effet, dans la section 4.2, l'imagerie mentale est décrite comme une forme de simulation plus explicite que d'autres types de simulations implicites et automatiques engagées dans le traitement du langage (e.g., Barlassina & Gordon, 2017 ; Barsalou, 2008).
- 4) *Une mémorisation impliquant de l'imagerie mentale met à disposition de manière plus accessible des éléments sensorimoteurs pour une récupération ultérieure.* Ceci est une déduction sur les mécanismes cognitifs sous-jacents faite à l'aide des points précédents.
- 5) *Une mémorisation impliquant de l'imagerie mentale rend donc la récupération plus probable qu'une mémorisation n'en impliquant pas (et donc une meilleure performance mnésique).* Ceci est la conséquence finale de l'utilisation de l'imagerie mentale. C'est ainsi une déduction sur les conséquences en termes de comportement observable découlant des points précédents.

En d'autres termes, récupérer une trace mnésique nécessite la simulation/reviviscence des états perceptifs, moteurs et introspectifs du corps au moment de l'encodage. Seulement, pour simuler toutes ces formes d'expériences, il faut qu'elles soient en premier lieu associées à l'information à récupérer. Si l'individu doit mémoriser le mot "shrub" mais qu'il n'a aucune expérience qui y est associée, il y a fort à parier qu'il ne se souviendra pas du mot sur le long terme. Dans ce travail de thèse, nous proposons que la pratique de l'imagerie mentale au moment de l'apprentissage permette l'activation d'une simulation sensorimotrice riche qui pourra se remettre en place plus facilement au moment de la récupération. Par ce biais, l'imagerie mentale permettra de rendre le rappel d'une trace plus probable. Ce concept de simulation est donc fondamental car il est à l'interface de nos trois thèmes : cognition incarnée, mémoire et imagerie mentale. De cette hypothèse générale, nous pouvons décliner quatre prédictions plus précises :

- 1) L'efficacité mnésique est corrélée à un continuum d'incarnation allant de stratégies peu incarnées n'impliquant pas d'imagerie mentale, à des stratégies plus incarnées impliquant une imagerie mentale riche en interactions sensorimotrices.
- 2) Ce continuum peut s'étendre au-delà de ces éléments sensorimoteurs : la présence de ces éléments est d'autant plus utile sur le plan mnésique qu'ils sont intégrés dans une situation cohérente (i.e., s'ils sont situés).
- 3) Le rôle des expériences sensorimotrices et introspectives est le même dans la mémorisation des concepts qu'ils soient concrets ou abstraits. Les concepts abstraits peuvent donc être efficacement mémorisés via l'imagerie mentale ;
- 4) Les bénéfices mnésiques issus d'une imagerie mentale incarnée peuvent se transférer à des situations écologiques d'apprentissage (e.g., apprentissage de concepts de cours)

7.4. Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en quatre chapitres. Pour chaque, un article est présenté, avec son stade de publication ainsi qu'un résumé en français (faisant la transition entre les articles) pour les articles en anglais.

Le premier chapitre teste l'hypothèse d'un continuum d'incarnation pour l'imagerie mentale. Il se base sur un article publié dans le *Quarterly Journal of Experimental Psychology* en 2021. Si la littérature sur l'imagerie mentale a déjà pu montrer que la mémorisation des mots était améliorée lorsque l'individu simulait activement les caractéristiques visuelles de l'objet à apprendre (cf. section 7.1), très peu d'études ont examiné l'efficacité de types d'imagerie mentale plus incarnés. Nous avons donc testé différentes stratégies de mémorisation se situant sur un continuum d'incarnation allant de stratégies faiblement incarnées comme la répétition mentale qui n'implique pas d'imagerie mentale, jusqu'aux stratégies fortement incarnées impliquant de l'imagerie motrice à la première personne. Il est attendu qu'une imagerie motrice à la première personne produise plus de rappels corrects qu'une imagerie motrice à la troisième personne, elle-même meilleure qu'une imagerie seulement visuelle, à son tour meilleure que de la répétition mentale.

Si la cognition incarnée soutient que la récupération mnésique repose sur des simulations sensorimotrices, ces simulations doivent être ancrées dans des situations, autrement dit, la cognition n'est pas seulement incarnée, elle est aussi située. Ainsi, au-delà de l'engagement de la modalité visuelle et motrice ou de la perspective mentale à adopter

(imagerie motrice à la troisième ou première personne), l'imagerie mentale détient nécessairement un aspect contextuel. En effet, s'imaginer agir sur un objet implique la plupart du temps de visualiser un environnement associé, voire un scénario cohérent. Dans un deuxième article, en cours de révision dans *Memory & Cognition*, nous avons donc testé l'efficacité d'une imagerie motrice située face à d'autres imageries et stratégies non explicitement situées (imagerie motrice, imagerie visuelle et répétition mentale) avec l'idée que l'ajout d'un aspect situé à l'imagerie motrice optimise ses bénéfices mnésiques.

Si les deux précédents articles portaient sur la mémorisation de mots concrets, le troisième article, soumis dans le *Journal of Memory and Language*, a pour but de tester l'efficacité de l'imagerie mentale sur la mémorisation de mots plus abstraits (e.g., « jalousie », « pacte »). Cette limitation aux concepts concrets n'est pas spécifique à nos articles, elle s'étend à la majorité des travaux en cognition incarnée. Notre troisième article a donc également pour objectif de montrer l'importance de l'activation du contenu expérientiel des concepts abstraits (via l'imagerie mentale) pour mémoriser ces derniers. Les deux expériences incluses dans cet article comparent une stratégie de mémorisation linguistique (donc peu tournée vers les expériences sensorimotrices liées au sens du concept) à une stratégie plus incarnée d'imagerie mentale (explicitement orientée vers les expériences visuelles et introspectives du concept), cette dernière étant censée permettre une meilleure performance de mémoire.

Le quatrième et dernier chapitre de la thèse porte sur l'application des précédents résultats en contexte écologique afin de proposer des préconisations scientifiques d'optimisation des processus mnésiques. Lors des trois premiers chapitres de la thèse, nous avons mené des expériences dans un environnement contrôlé et impliquant la mémorisation de liste de mots. Ce quatrième chapitre est l'occasion d'aborder l'efficacité de l'imagerie mentale dans un contexte de révision à l'université, ce qui suppose notamment la mémorisation de matériel plus écologique (type définitions plutôt que des mots isolés). Nous avons mis en place différentes mesures d'apprentissage de concepts (et de définitions) de cours vus quelques jours plus tôt et appris sans ou avec des consignes d'imagerie mentale explicite. Selon nos prédictions, cette dernière condition doit faciliter la rétention des concepts et de leur définition sur le long terme, que ce soit pour les tests de rappel libre, les tests de reconnaissance ou les QCM.

CHAPITRE 1 : UN CONTINUUM D'INCARNATION POUR LES STRATÉGIES DE MÉMORISATION

Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (2021). Embodied Mental Imagery Improves Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. doi: <https://doi.org/10.1177/17470218211009227>

Cet article a été accepté pour publication dans le Quarterly Journal of Experimental Psychology, édité par SAGE publishing.

Selon le paradigme de la cognition incarnée, les processus cognitifs sont ancrés dans les systèmes sensoriels, moteurs et émotionnels. Cette théorie soutient l'idée que la compréhension du langage et la récupération de trace mnésique sont basées sur la simulation, la reviviscence d'expériences vécues perceptives, motrices et émotionnelles. Ceci explique efficacement les résultats expérimentaux concernant l'imagerie visuelle. Ces derniers montrent que la mémorisation des mots est améliorée lorsque l'individu simule activement les caractéristiques visuelles de l'objet à apprendre. Cependant, très peu d'études ont examiné l'efficacité de types d'imagerie mentale plus incarnés, c'est-à-dire des types d'imagerie qui mobiliseraient à la fois les aspects sensoriels et moteurs de l'objet. Ces études échouent également à distinguer l'influence des composants moteurs et des composants visuels sur la performance mnésique.

Pour ce premier travail de thèse, nous avons postulé que les stratégies de mémorisation se situent sur un continuum allant des stratégies faiblement incarnées (par exemple, la répétition mentale) aux stratégies fortement incarnées impliquant de l'imagerie motrice à la première personne. Ce continuum repose sur l'idée que les éléments sensorimoteurs sont des indices privilégiés pour la récupération. Plus la mémorisation fait consciemment appel à une élaboration mentale sensorimotrice à propos d'un objet, plus les indices sensorimoteurs sont disponibles pendant la récupération, facilitant ainsi cette récupération de la trace mnésique.

Dans cette étude, nous avons donc testé l'efficacité mnésique de différentes stratégies mnésiques sur ce continuum d'incarnation. Après un entraînement avec 10 mots, les participants devaient mémoriser 30 noms d'objets en utilisant la stratégie de mémorisation qui leur était indiquée. Ils étaient attribués aléatoirement à un groupe de stratégie parmi quatre. Pour chacun des 30 mots et pendant 7 secondes, ils devaient soit répéter mentalement le mot ; soit créer une image mentale du référent du mot ; soit imaginer prendre et lancer l'objet d'un point de vue extérieur, à la troisième personne (s'imaginer depuis l'extérieur de

son corps) ; soit imaginer prendre et lancer l'objet de son propre point de vue, à la première personne. Après avoir écouté la liste de mots, les participants devaient remplir un test de rappel libre ainsi que le *Vividness of Visual Imagery Questionnaire* (VVIQ) puis le *Vividness of Movement Imagery Questionnaire* (VMIQ-2). Ils étaient recontacté 48 heures plus tard afin de remplir en ligne un second test de rappel libre.

Au niveau du rappel immédiat, les données de nos 83 participants ont indiqué que les participants de la condition d'imagerie visuelle avaient correctement rappelé plus de mots que ceux de la condition contrôle (répétition mentale) qui impliquait peu de simulation multimodale. L'imagerie motrice à la première personne s'est avérée être la stratégie la plus efficace de toutes. L'ajout de la simulation des caractéristiques motrices à l'imagerie purement visuelle a amélioré les performances de rappel. En revanche, contrairement à nos prédictions, l'imagerie motrice à la troisième personne n'était pas significativement différente de l'imagerie visuelle. Il est possible qu'en troisième personne, l'imagerie motrice ne soit pas suffisamment incarnée pour recruter directement les systèmes impliqués dans la motricité. Il semblerait donc que les avantages mnésique liés à la motricité ne s'observent qu'à la première personne, autrement dit, qu'à certain degré minimum d'incarnation. Ceci suggère l'existence d'un continuum d'efficacité mnésique allant de stratégies peu incarnées (*i.e.*, impliquant peu de simulation perceptive et/ou motrice) à des stratégies plus incarnées (*i.e.*, impliquant de riches simulations du référent du mot sur le plan perceptif et moteur). Ces résultats font écho à la littérature sur la cognition incarnée, qui a souligné à plusieurs reprises le rôle fondamental de l'action et de la motricité dans la cognition. Ce continuum d'incarnation tend à disparaître avec le temps. En effet, les bénéfices mnésiques des trois types d'imagerie s'estompent après 48 heures, ce qui les ramènent toutes au même niveau, tout en restant au-delà de la répétition mentale. Étonnamment, les habiletés d'imagerie mentale autant visuelle (mesurées avec le VVIQ) que motrice (mesurées avec le VMIQ) n'ont pas joué de rôle dans ce phénomène.

Embodied Mental Imagery Improves Memory

Quentin Marre, Nathalie Huet and Elodie Labeye

CLLE Laboratory (Cognition, Languages, Language, Ergonomics), UMRS 5263-
CNRS, University of Toulouse Jean Jaurès, Toulouse, France

Abstract

According to embodied cognition theory, cognitive processes are grounded in sensory, motor and emotional systems. This theory supports the idea that language comprehension and access to memory are based on sensorimotor mental simulations, which does indeed explain experimental results for visual imagery. These results show that word memorization is improved when the individual actively simulates the visual characteristics of the object to be learned. Very few studies, however, have investigated the effectiveness of more embodied mental simulations, that is, simulating both the sensory and motor aspects of the object (i.e., motor imagery) from a first-person perspective. The recall performances of 83 adults were analysed in four different conditions: mental rehearsal, visual imagery, third-person motor imagery, and first-person motor imagery. Results revealed a memory efficiency gradient running from low-embodiment strategies (i.e., involving poor perceptual and/or motor simulation) to high-embodiment strategies (i.e., rich simulation in the sensory and motor systems involved in interactions with the object). However, the benefit of engaging in motor imagery, as opposed to purely visual imagery, was only observed when participants adopted the first-person perspective. Surprisingly, visual and motor imagery vividness seemed to play a negligible role in this effect of the sensorimotor grounding of mental imagery on memory efficiency.

Keywords: simulation; memory strategies; word retention; embodied cognition

Mental imagery can be defined as a “quasi-perceptual experience” that “resembles perceptual experience, but occurs in the absence of appropriate external stimuli” (Thomas, 2014, p. 1). It occurs constantly in everyday life, be it when remembering past events, projecting ourselves into the future, or representing the route someone is describing to us. It should be noted that the term *imagery* does not only concern images. *Visual imagery* can be either *object imagery*, which consists in visualizing the details of individual objects and scenes in terms of shape, color, brightness and texture or *spatial imagery* when this visualization

concerns spatial relations, movements of objects and their parts, and spatial transformations such as mental rotation (Blazhenkova, 2016). Visual imagery relies on the manipulation of representations that share the same attributes as percepts (Borst & Kosslyn, 2008; Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978; Shepard & Metzler, 1971), and requires the activation of the same brain systems that are involved in visual perception (Albers, Kok, Toni, Dijkerman, & de Lange, 2013; Kosslyn & Thompson, 2003). Shepard and Metzler (1971), for example, showed that the time taken to resolve visuo-spatial tasks correlates linearly with the difference between the angle of the starting figure and the target figure, which suggests that there is an actual rotation of the image that is operated mentally. Kosslyn highlighted the properties of mental scanning, showing that it takes more time for participants to mentally move between two nearby elements than between two distant ones (Kosslyn, Ball & Reiter, 1978).

Imagery may involve not only other sensory modalities, like olfaction and audition, but also the motor modality. In this case, *motor imagery* is defined as a mental reproduction of physical activity without any actual movement (Driskell, Copper, & Moran, 1994). The visual sense is involved: actions can be imagined either from an internal/first-person perspective, such as being inside one's body or having a camera on one's head, or from an external perspective, either observing oneself performing an action or observing someone else perform an action (Guillot et al., 2009; Roberts, Callow, Hardy, Markland, & Bringer, 2008). In motor imagery, the kinaesthetic sense is generally involved, that is, the sensation of executing a movement, feeling the contraction and stretching of the muscles and the position of the limbs relative to others (Cumming & Williams, 2012; Guillot et al., 2009). This kinaesthetic imagery can be performed in either external or internal motor imagery (Glisky, Williams, & Kihlstrom, 1996; Robert et al., 2008). Just as visual imagery shares attributes with visual perception, motor imagery involves the same neural networks (e.g., primary motor cortex, premotor cortex, cerebellum or somatosensory cortex) as the actual physical actions (Cumming & Williams, 2012). This explains several features of motor imagery such as the activation of the limb muscles affected by the action in question (Lebon, Rouffet, Guillot, & Collet, 2008). There are also identical temporal characteristics between the duration of the imagery and the duration of the movement, suggesting an actual motor simulation during imagery (Guillot & Collet, 2005). Motor imagery is grounded in the body of the individual with all its specificities. In a task where left-handers and right-handers had to imagine actions designated by verbs, some manual others not, a difference in the lateralization of the motor cortex was found between right-handers and left-handers for the imagery of manual action verbs (Willems, Toni, Hagoort, & Casasanto, 2009). Similarly, Schwoebel, Friedman, Duda and Coslett (2001) showed that for patients with chronic pain in one of their arms, the duration of motor imagery involving the painful arm was longer than when they imagined doing the movement with their unaffected arm, once again indicating that motor imagery is a simulation grounded in the body

of the individual. Motor imagery can also be influenced by the perspective that is taken (Lorey et al., 2009; Sigiru & Duhamel, 2001). For example, Lorey and her colleagues (2009) found that imagining a hand movement was influenced by the current position of the participant's hand, in that it was facilitated if the actual position of the hand was the same as that of the imagined hand. This facilitation was observed if participants imagined the movement from a first-person perspective (i.e., imagining it from their own point of view), but not if they imagined it from a third-person perspective (i.e., imagining it from the outside, out of their body).

One interesting property of mental imagery is its positive impact on memory performances when people processing stimuli are compared according to whether they have been given a mental imagery instruction or not. Participants who have been given a visual imagery instruction remember verbal material better, especially words of high *imageability* (e.g., Bower, 1972; Gupton & Frincke, 1970; McCauley, Eskes, & Moscovitch, 1996; Mueller & Jablonski, 1970; Paivio, 1971; Pressley & Brewster, 1990). In Bower (1972), for instance, participants were instructed to memorize 20 concrete-noun pairs either by imagining a visual scene in which the two objects of the pair interacted, or by just memorizing the relation between the two words. In this typical example, participants in the imagery group performed about 30% better than controls on both immediate and delayed cued recall tests. Recent studies have yielded similar patterns of results, with participants who were given an imagery instruction (compared with others who were told not to use imagery) correctly recalling or recognizing more items (Oliver, Bays, & Zabrocky, 2016) and producing fewer false memories (Foley, 2012; Foley, Hughes, Librot, & Paysnick, 2009; Foley, Wozniak, & Gillum, 2006; Robin & Mahé, 2015).

Furthermore, motor imagery can facilitate motor learning. A meta-analysis by Driskell et al. (1994) measured the effect of mental practice on performance against a 100 scientifically tested hypotheses, and found a significant effect of mental practice on performance (albeit weaker than actual practice). A literature review focusing mainly on athletes in laboratory studies and follow-up of athletes by Weinberg (2008) also went in this direction, its results seemingly attesting to the effectiveness of motor imagery. Holmes and Collins (2001) developed the Physical, Environment, Task, Timing, Learning, Emotion and Perspective (PETTLEP) model to condense the important variables for effective motor imagery. These authors advise maximizing resemblance to the actual physical performance (e.g., posture, sports clothes), physical environment, content of the pictorial task, timing, emotions felt, and perspective (i.e. first-person).

The scientific literature has frequently provided theoretical frameworks for explaining the nature and properties of mental imagery. However, few of these have given a coherent explanation that integrates neuroscience observations and allows the positive effects of mental

imagery on memorization to be easily described. The embodied cognition paradigm takes up this challenge by offering a framework that fits well with the features of mental imagery described above. It states that cognitive processes are grounded in our bodily experiences and that high-level cognitive processes cannot be detached from the peripheral brain systems that process input from the outside world. There are several embodied approaches. Simulation theory states that the brain captures modal states during perception, action and introspection and later simulate these states to represent knowledge. Cognition therefore corresponds to the activation of modal states, be they perceptual, motor or emotional, and more particularly to the simulation or partial re-enactment of lived experiences (Barsalou, 1999; Barsalou, Simmons, Barbey, & Wilson, 2003). It is supported by neuroscience data which suggest that memory retrieval involves multimodal simulation. For example, word retrieval requires the reactivation of the sensory cortex regions activated at encoding (see Buckner & Wheeler, 2001, for a review), or put another way, the simulation of the modal operations performed at encoding. This happens to be in line with the encoding specificity principle which states that “specific encoding operations performed on what is perceived determine what is stored, and what is stored determines what retrieval cues are effective in providing access to what is stored” (Tulving & Thomson, 1973, p.369). Consequently, item retrieval is facilitated when the retrieval context matches the encoding context. This contextual element can be either the physical environment (Godden et Baddeley, 1975), posture (Dijkstra, Kaschak, & Zwaan, 2007) or a previously associated sensory stimulus (Brunel, Labeye, Lesourd, & Versace, 2009). Therefore, memory traces are composed of sensorimotor elements of the encoding context and remembering seems to reactivate sensorimotor cortices involved in encoding.

It is worth mentioning that other embodied approaches in the embodied cognition paradigm deny the existence of representations. According to the enactive approach, perception is a form of active interrogation of the environment that uses the sensory system to search for specific information needed for action at a particular moment (Thomas, 1999, 2014). Mental imagery is therefore a partial re-enactment, a mental rehearsal of the exploratory perceptual acts that are executed during actual perception. According to sensorimotor theory, there is no such mental rehearsal of perceptual acts. The experience of mental imagery would emerge from the activation or exercise of a practical sensorimotor knowledge of possibilities for action. This sensorimotor knowledge concerns how sensory inputs (e.g., visual stimulations) changes as a function of motor outputs (movements). Mental imagery is therefore simply the fact of holding implicit expectations regarding how sensory stimulation changes as a function of movement (Foglia & O'Regan, 2015). Whatever the theory, the embodied cognition paradigm defends the idea that processes like mental imagery, conceptual processing or memory, are based on the reactivation of sensorimotor brain patterns activated during the real experience to which the knowledge refers. In the present

study, we adopted the perspective of simulation theory, and hypothesized that mental imagery corresponds to a mental simulation, emphasizing certain visual attributes during visual imagery, or certain motor attributes during motor imagery. Behavioural empirical data and neural activations reported in the mental imagery literature are highly consistent with empirical data defending the simulation view.

The literature shows that memorization is enhanced when the individual actively simulates the visual characteristics of the object to be learned, that is to say when participants are explicitly instructed to perform visual imagery. However, few studies have investigated the effectiveness of more embodied imagery (i.e., instructions that promotes mental simulation of both sensory and motor aspects of the object) or else have failed to distinguish between the influence of motor versus visual components of imagery on memory performance. Motor imagery presumably promotes the re-enactment not only of visual experiences, but also of motor (and potentially kinaesthetic and tactile) ones, thus increasing the number of modalities by which the memory trace can be retrieved. Motor imagery may also induce a higher degree of self-involvement than a nondynamic mental image that does not involve any mental action on the part of the individual, and personal involvement is known to be a factor favouring retention (Rogers, 1977). In addition, first-person motor imagery may be more efficient than third-person motor imagery, as the degree of self-involvement is greater in the first person (Bagri & Jones, 2018) and the level of embodiment is higher, as third-person imagery preferentially recruits nonmotor structures (Lorey et al., 2009; Sigiru & Duhamel, 2001). We therefore postulated that memory strategies lie on a continuum running from low embodiment strategies (e.g., mental rehearsal) to high embodiment strategies involving first-person motor imagery. This continuum is based on the idea that sensorimotor elements are privileged cues for retrieval. The more the memorization consciously calls for a sensorimotor mental elaboration about an object, the more sensorimotor cues are available during retrieval, thus facilitating the retrieval of the memory trace.

Overview of the Present Study

The present study was design to distinguish between the influence of visual imagery and the influence of motor imagery and compare the two, in order to test the idea of an embodiment continuum in imagery that results in varying efficiency depending on the memorization strategy adopted. In our study, participants were asked to memorize a 30-word list using either mental rehearsal, visual imagery, third-person motor imagery, or first-person motor imagery. For each group, we analysed the numbers of correct and incorrect responses at immediate and delayed (48 hours later) recall. We expected the continuum of memory embodiment strategies to be reflected in memory performances. In other words, the recall rate would improve as the embodiment level of memory strategies increased. More specifically,

recall performance would be better when learning was based on first-person motor imagery rather than on third-person motor imagery. These performances would also be better than those resulting from learning with visual imagery, which in turn would be better than memorization based on mental rehearsal. According to several authors, the level of imagery skills influences the cognitive benefits of imagery. Thus, visual imagery can decrease false memories, but only for individuals with high visual imagery abilities (Marmurek & Hamilton, 2000). In addition, vividness plays a key role in the retrieval of sensory traces (Palmiero et al., 2019) as individuals who are able to create vivid images activate their brain more selectively than low-vividness imagers (Fulford et al., 2018). We therefore predicted that visual and motor imagery vividness would moderate the effect of memory strategy on recall performance.

Method

Participants

Participants were 85 adults (59 women and 26 men), who were randomly divided into four groups corresponding to the encoding conditions: mental rehearsal group (MR), visual imagery group (VI), third-person motor imagery group (TPI), and first-person motor imagery group (FPI). Persons under 18 and over 50 years were excluded, as were individuals who did not speak French fluently. The participants were mostly psychology students recruited on the campus of Toulouse Jean Jaurès University. Their mean age was 23 years ($SD = 5.27$, range = 18-45). They all volunteered to take part in the research, and gave their written informed consent.

To know if the number of participants was sufficient for the desired statistical power, we ran a G*Power (Faul, Erdfelder, Buchner & Lang, 2009; Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007; Version 3.1.9.6) analysis. The effect size was often not available in the literature so we were forced to base our expected effect size on the most recent researches on memory and imagery (Foley, 2012; Foley et al., 2006; Foley et al., 2009, Oliver et al., 2016). We took the smallest effect size we found in these articles ($\eta^2 = .24$, Cohen's $f = .56$). The G*Power analysis yielded a total sample size of 40 (for $\alpha = .05$, power = .80, number of groups = 4). As we recruited more participants (85) than the minimum sample size required according to the G*Power analysis, our sample size was not a problem in terms of statistical power.

Materials

Participants in all four groups heard the same list of 30 nouns to memorize in the form of a recording (one word every 7 s). We only used referents that were nonliving and lent themselves to manual motor imagery. Based on these two criteria, we selected words with the highest sensory experience scores in Bonin, Méot, Ferrand, and Bugajska (2015)'s study. A

sensory experience score refers to the degree to which a word generates sensory and perceptual experiences (Juhasz & Yap, 2013). A list of 10 words was created in the same way for the training phase. Words used in the experiment are available in the Supplemental Material, together with their associated sensory experience score and other psycholinguistic variables: concreteness, context availability, emotional valence, arousal, and imagery value, based on the norms established by Bonin, Meot, and Bugaiska (2018) and Bonin et al. (2003). Frequency was measured with the GlàffOLI web interface using the FrWAc indicator (Sajous, Hathout, & Calderone, n.d.).

For the immediate free recall test, participants were each given a sheet with 30 spaces in which to write the remembered words. There were also two 6-point scales, one to rate the ease of performing the memorization task, the other to indicate how far retrieval was based on the memory strategy indicated in the instruction. There was also a question about any other strategies that were used.

The delayed free recall test was the same as the immediate one, except that it was sent as an online questionnaire (via Qualtrics) to participants 48 hours later.

We used the French Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ; Santarpia et al., 2008) to measure the level of vividness the participants were able to reach in visual imagery. This questionnaire contains 32 items, each rated on a 5-point vividness scale ranging from 1 (*No image is visible*) to 5 (*The image is perfectly clear, as sharp and precise as a real-life perception*). The Vividness of Movement Imagery Questionnaire Version 2 (VMIQ-2; Roberts, Callow, Hardy, Markland, & Bringer, 2008) was used to measure their ability to do vivid motor imagery. This questionnaire contains 36 items, each rated on a 5-point vividness scale ranging from 1 (*Perfectly clear and as vivid as normal vision or feel of movement*) to 5 (*No image at all, you only know that you are thinking of the skill*).

Procedure

The experiment began with a training phase, where the experimenter explained that the participants would hear a list of 10 words, each separated by a 7-second interval, and would have to respect one of the following instructions for each word: either mentally rehearse the word (MR); create a mental image of the word's referent (VI); imagine taking and throwing the object from an external point of view, in the third person (TPI); or imagine taking and throwing the object from one's own point of view, in the first person (FPI). The action to be imagined was standardized, in order to control for interindividual variability in the imaginary interaction with the object as much as possible. Instructions are available in the Supplemental Material. During the listening phase, participants were asked to close their eyes and lay their hands flat on their knees (to control for the influence of posture on the motor imagery). We also asked them to chunk the information as little as possible and to perform the task for each

word independently of the other words. After listening to the list, participants had to fill in the free recall sheet and the two rating scales for each word. The instruction for the experimental phase was exactly the same as for the training phase, but with a 30-word list. After the immediate recall test, participants were asked to complete the VVIQ and then the VMIQ-2. They were contacted 48 hours later to perform the delayed recall test.

Results

Two participants were excluded because they did not follow the instructions. We therefore analysed the data of 83 participants (20 for MR, 21 for VI, 21 for TPI, and 21 for FPI). These analyses were performed using R software. Tests based on comparisons of means were performed when assumptions were met. Otherwise, nonparametric tests were used.

Immediate Recall

We ran a one-way analysis of variance (ANOVA) for independent samples on the number of correctly recalled words. This revealed a significant effect of type of instruction on the number of correct responses, $F(3, 79) = 12.7, p < .001, \eta^2_p = .325$. A unilateral post hoc test with Bonferroni correction showed that this effect was due to the fact that participants in the FPI group correctly recalled significantly more words ($M = 19.6, SD = 4.26$) than those in either the TPI ($M = 16.2, SD = 3.46, p = .01$), VI ($M = 16.1, SD = 3.79, p < .01$), or MR ($M = 12.6, SD = 2.89, p < .001$) groups. Participants in the TPI group correctly recalled significantly more words than those in the MR group ($p < .01$), and there were significantly more correct responses in the VI group than in the MR group ($p < .01$). However, recall performances did not differ significantly between the VI and TPI groups ($p = 1.00$). These results are reflected in the sizes of the confidence intervals in Figure 1.

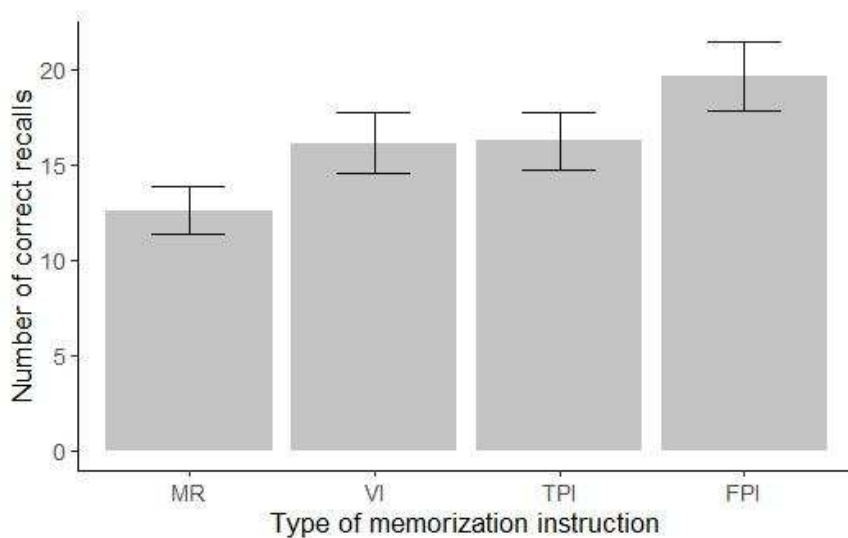


Figure 1. Mean number of words correctly recalled by participants in each group with 95% confidence intervals. MR: mental rehearsal; VI: visual imagery; TPI: third-person motor imagery; FPI: first-person motor imagery.

Regarding the numbers of incorrectly recalled words, the mean was 0.70 ($SD = 1.26$) for MR, 0.29 ($SD = 0.72$) for VI, 0.38 ($SD = 0.80$) for TPI, and 0.24 ($SD = 0.54$) for FPI. A Kruskal-Wallis test failed to reveal a significant effect of instruction type on the number of incorrectly recalled words, $\chi^2(3) = 3.14, p = .37$.

For the VVIQ results, the mean was 119.9 ($SD = 14.2$) for MR, 121 ($SD = 19.3$) for VI, 125 ($SD = 18.0$) for TPI, and 131 ($SD = 16.4$) for FPI. For the VMIQ-2 results, the scale was reversed, such that the minimum degree of vividness was 1, and the maximum 5. The mean was 134 ($SD = 20.7$) for MR, 136 ($SD = 19.5$) for VI, 145 ($SD = 23.5$) for TPI, and 140 ($SD = 18.9$) for FPI. We had expected to observe a moderating effect of visual imagery and motor imagery vividness on the relation between instruction and memory performances. However, these scores failed to predict immediate recall performance. The regression coefficients for VVIQ scores ($b = .011, t(76) = .322, p = .748$) and VMIQ scores ($b = .017, t(76) = .569, p = .571$) were not significant. This regression model did not account for a significant portion of the variance in memory performance, $R^2_{adj} = -.013, F(2,76) = .497, p = .611$. Since no link could be found between imagery vividness and memory performance, no moderation effect of vividness could be revealed on the effect of instructions on immediate memory performances.

Delayed Recall

Of the initial sample of 83 participants, only 79 responded to the delayed recall test (19 for MR, 21 for VI, 20 for TPI, and 19 for FPI).

A one-way ANOVA for independent samples showed that the effect of instructions on the number of correctly recalled words was still present after 48 hours, $F(3, 75) = 8.77, p < .001, \eta^2p = .260$. When we investigated this effect more closely, a unilateral post hoc test with Bonferroni correction showed that more words were correctly recalled by participants in the FPI ($M = 14.0, SD = 5.89, p < .001$), TPI ($M = 10.1, SD = 4.49, p < .05$) and VI ($M = 10.9, SD = 4.99, p < .05$) groups than in the MR ($M = 5.79, SD = 3.95$) group. However, there were no significant differences between the three imagery groups. This is in agreement with the overlapping confidence intervals in the diagram in Figure 2.

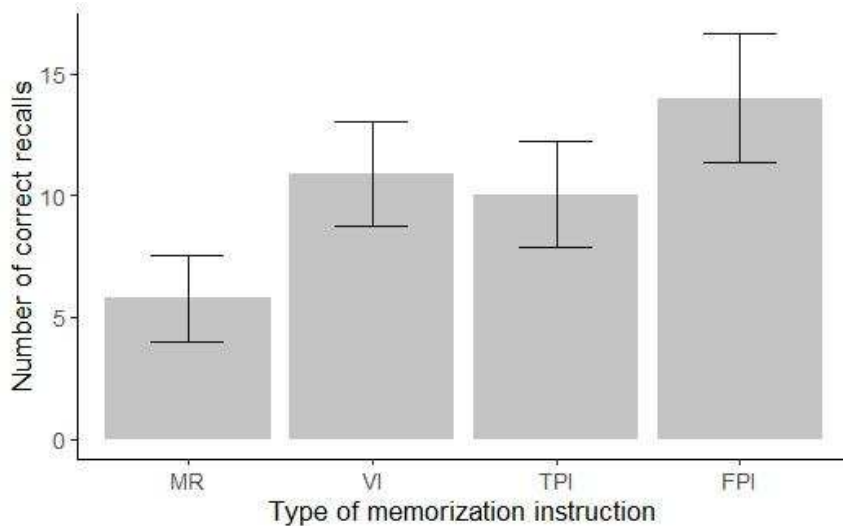


Figure 2. Mean number of words correctly recalled by participants in each group with 95% confidence intervals. MR: mental rehearsal; VI: visual imagery; TPI: third-person motor imagery; FPI: first-person motor imagery.

After 48 hours, the mean number of incorrectly recalled words was 2.00 ($SD = 2.21$) for MR, 1.19 ($SD = 1.54$) for VI, 1.95 ($SD = 2.35$) for TPI, and 2.42 ($SD = 2.01$) for FPI. Once again, a Kruskal-Wallis test failed to reveal a significant effect of instruction type on the number of incorrectly recalled words, $\chi^2(3) = 4.32, p = .23$. We had expected to observe a moderating effect of visual imagery and motor imagery vividness on the relation between instruction and delayed correct recalls. The regression coefficients for VVIQ scores ($b = .031, t(72) = .653, p = .516$) and VMIQ scores ($b = .030, t(72) = .739, p = .462$) were not significant. This regression model did not account for a significant portion of the variance in memory performance, $R^2_{adj} = .003, F(2,72) = 1.13, p = .329$. Even after 48 hours, no link could be found between imagery vividness and memory performance, therefore no moderation effect of vividness could be revealed on the effect of instructions on delayed memory performances.

Ease of Performing the Memorization Task and Use of Instructed Strategy

Mean ratings for the ease of performing the task in the MR ($M = 5.07$), VI ($M = 5.11$), TPI ($M = 4.41$) and FPI ($M = 5.1$) groups were all between 4 (*Fairly easy*) and 6 (*Very easy*). A one-way ANOVA for independent samples showed no significant difference between the groups, $F(3, 77) = 2.20, p = .095$. Participants therefore generally complied with the instructions with relative ease in each experimental condition.

Mean ratings for the extent to which participants used the instructed strategy in the MR ($M = 4.58$), VI ($M = 3.84$), TPI ($M = 4.24$) and FPI ($M = 4.39$) groups were all between 3 (*Medium*) and 5 (*High*). A one-way ANOVA for independent samples failed to reveal any

significant difference between groups, $F(3, 77) = 1.27, p = .292$. Therefore, most of the participants remembered the words using the strategy indicated in the instructions.

Other Memory Strategies

A total of 49 participants (57%) stated that they used another complementary strategy. They were mainly in the MR group, where 80% of participants declared that they had semantically chunked the words in order to remember them. In the imagery groups, participants mainly used semantic chunking and mental rehearsal: 57% in VI, 38% in TPI, and 52% in FPI.

Controlling the gender effect

Gender differences may be observed in mental imagery (e.g., Campos, 2014; Richardson, 1995) and in the memory benefit of imagery mnemonic instructions (e.g. Lenhart & Schwartz, 1983; Metzger & Antes, 1976). In order to ensure that gender has no influence on the link between instructions and memory performance, we ran an ANOVA with gender and instructions as independent variables and found that there is no main effect of gender on the number of immediate correct recalls, $F(1,75) = .248, p = .620$, and no interaction between gender and instructions, $F(3,75) = .295, p = .829$. The same pattern was observed on delayed correct recalls where no main effect, $F(1,71) = .107, p = .745$, or interaction effect, $F(3,71) = .103, p = .958$, was significant. The imager could be a man or a woman, the effect of instructions on memory performance was the same.

Discussion

Our first hypothesis concerned the effect of type of memory strategy (induced by the instructions in the experiment) on recall performance. More specifically, we postulated that memory efficiency increases with the strategies' level of sensorimotor simulation. This hypothesis was generally corroborated.

First, as expected, participants in the VI condition correctly recalled more words than those in the MR condition, which involved little multimodal simulation. This is in agreement with the results of classic studies such as those of Paivio (1971), as well as more recent ones (e.g., Oliver et al., 2016).

Second, as expected, FPI proved to be the most effective strategy of all. Adding the simulation of motor characteristics to purely visual imagery improved its memory benefits. This echoes the embodied cognition literature, which has repeatedly highlighted the fundamental role of action and motor skills in cognition, whether in word recall (Engelkamp, Seiler, & Zimmer, 2004; Senkfor, Van Petten, & Kutas, 2002) or in conceptual processing (Siakaluk, Pexman, Aguilera, Owen, & Sears, 2008).

Regarding TPI, results showed that it did not differ significantly from VI, contrary to predictions. We had expected the performances of participants in the TPI group to lie between those of the VI group and those of the FPI group, but this was not the case. It may be that in the third person, motor imagery is not sufficiently embodied to recruit brain structures that are not directly involved in motor skills (Sigiru & Duhamel, 2001).

Over the longer term, strategies based on imagery (i.e. VI, TPI and FPI) remained more effective than MR. The benefits of motor simulation, however, appeared to fade over time, as the recall performance of participants in the FPI group no longer differed from that of participants in the VI group after 48 hours. This means that the motor memory trace had no consolidation advantages over the other conditions.

No particularly salient result pattern was detected for incorrect recall, in contrast to the results of Foley (2012) and her colleagues (2006; 2009) for imagery instructions. These results are most certainly due to the fact that our experimental protocol was not conducive to the emergence of false memories, unlike the Deese-Roediger-McDermott (DRM) paradigm used by these researchers.

Our second hypothesis concerned the moderation of the association between strategy and recall by visual or motor imagery vividness. Surprisingly, both types of vividness seemed to play only a negligible role. This went against not only our hypothesis, but also what the literature (i.e., Fulford et al., 2018; Marmurek & Hamilton, 2000; Palmiero et al., 2019) suggests. It may be that the questionnaires we used were not sensitive enough to capture the variability of the vividness level among the participants, thus preventing us from detecting an effect. However, a more likely explanation is that we treated the vividness variables differently. Most researchers studying the role of imagery vividness divide their participants into vividness level groups (high vs. low vividness). In the present study, however, we preferred to leave the vividness variables as continuous variables and not to arbitrarily dichotomize them.

These results point to the existence of a memory efficiency gradient running from low-embodiment (i.e., poor perceptual and/or motor simulation) to high-embodiment (i.e., rich simulation in sensory and motor systems engaged in interactions with the object) strategies. This is a logical follow-on from previous studies (e.g., Engelkamp et al., 2004; Senkfor, Van Petten, & Kutas, 2002) suggesting that there is a gradient of effectiveness in recalling action verbs running from the reading of the verb and then the observation of the action designated by the verb to the actual personal action. More generally, this continuum is in line with embodied and grounded theories (e.g., Barsalou, 1999; Barsalou et al., 2003). The recall of concepts related to words requires the simulation of sensorimotor experiences that have contributed to the creation of the meaning of these concepts. In our experiment, mental rehearsal did not favour this type of simulation during encoding. In this case, because there was no explicit perceptual and/or motor simulation instruction, individuals did not

intentionally implement this cognitive strategy. The resulting memory trace had few sensory and motor components. By contrast, active visual imagery favoured the emergence of visual experiences, and motor imagery promoted the re-enactment not only of visual experiences, but also of motor (and potentially tactile and kinaesthetic) ones. The intentional cognitive activity of sensorimotor simulation seemed to increase the memory effects of mental imagery compared with other types of imagery.

Through the experimental conditions tested in the present study, we were able to elicit an increasingly rich multimodal simulation with greater probability of word retrieval. The positive effects of the FPI condition could be predicted by the more radical embodied theories. From the sensorimotor perspective (Foglia & O'Regan, 2015) practical sensorimotor knowledge was more accessible in the FPI condition than it was in other the conditions, presumably making it easier to exercise knowledge about how the object should look as a function of movement. During retrieval, this knowledge about the object was presumably more accessible (having been more explicitly exercised during encoding), thus facilitating recall. From the enactive perspective (Thomas, 1999, 2014), because it was potentially easier to perceptually explore an object in FPI, it may also have been easier to recreate that exploration when recalling the word associated with the object.

In brief, the embodied cognition paradigm allowed us to shed new light on the links between mental imagery and memory. This study also had the merit of providing original data on different types of imagery and their relative efficiency in terms of memorization. These results could thus be used to optimize memory strategies, especially in the school context, although the effect on abstract concepts has yet to be ascertained. In our experiment, the word list contained quite concrete words. Although the sensorimotor grounding of mental imagery was found to have an effect on the memorization of these concrete words, results might have been different for more abstract ones. According to the language-and-situated-simulation theory (Barsalou, Santos, Simmons, & Wilson, 2008), the implication of modal systems is not exactly the same for abstract concepts, although in categorization tasks, access to these abstract concepts is facilitated by the level of sensory experiences they produce (Zdrzilova & Pexman, 2013).

Finally, it should be noted that several experimental modifications will have to be made in order to reproduce and confirm our results. First, many of our participants reported verbally that third-person motor imagery was particularly hard to master. Thus, even if there were motor activations, this difficulty may have reduced the memory benefits of the motor simulation that could be fully manifested in the first person. It is difficult to determine whether the difference between third- and first-person imagery arose because the former is harder to achieve or because it is less embodied. Second, a number of participants, most of them in the mental rehearsal condition, said that they used other strategies to memorize the words. It is

possible that this type of memorization spontaneously encourages people to adopt other, more effective strategies. However, the results of our study show that the chunking strategy they favoured did not actually result in higher scores than those resulting from mental imagery strategies. Finally, some of the objects named in the word list may have been linked to one or more prototypical actions (e.g. reading a book, eating an apple) that conflicted to a greater or lesser degree with the action indicated in the motor imagery instructions. Thus, in the case where the action intuitively related to the object was close to the action indicated in the instruction, the recall of certain words may have been facilitated. It would be advisable to consider complementing the questionnaires with different metrics of visual and motor imagery skills, such as response times or neurophysiological markers, which would provide information on the nature of the participants' subjective experience. These same neurophysiological measures could also prove useful for verifying the correct execution of the imagery tasks.

Declaration of Competing Interests

The authors declare that there are no conflicts of interest.

References

- Albers, A. M., Kok, P., Toni, I., Dijkerman, H. C., & de Lange, F. P. (2013). Shared representations for working memory and mental imagery in early visual cortex. *Current Biology*, *23*(15), 1427–1431. doi: 10.1016/j.cub.2013.05.065
- Bagri, G. & Jones, G. V. (2018). The role of first person perspective and vivid imagery in memory for written narratives. *Educational Psychology in Practice*, *34*(3), 229–244. doi:10.1080/02667363.2018.1431522
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 577–660. doi: 10.1017/S0140525X99002149
- Barsalou, L. W., Santos, A., Simmons, W. K., & Wilson, C. D. (2008). Language and simulation in conceptual processing. In M. de Vega, A. Glenberg, & A. Graesser (Eds.), *Symbols and embodiment: Debates on meaning and cognition* (pp. 245–283). Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780199217274.003.0013
- Barsalou, L. W., Simmons, W. K., Barbey, A. K., & Wilson, C. D. (2003). Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *TRENDS in Cognitive Science*, *7*(2), 84–91. doi: 10.1016/S1364-6613(02)00029-3

- Blazhenkova, O. (2016). Vividness of object and spatial imagery. *Perceptual and Motor Skills*, *122*(2), 490–508. doi: 10.1177/0031512516639431
- Bonin, P., Méot, A., Aubert, L.-F., Malardier, N., Niedenthal, P. M., & Capelle-Toczek, M.-C. (2003). Concreteness, imageability, subjective frequency and emotionality ratings for 866 words. *L'Année Psychologique*, *103*(4), 655–694. doi:[10.3406/psy.2003.29658](https://doi.org/10.3406/psy.2003.29658)
- Bonin, P., Méot, A., & Bugajska, A. (2018). Concreteness norms for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and word recognition times. *Behavior Research Methods*, *50*(6), 2366–2387. doi: 10.3758/s13428-018-1014-y
- Bonin, P., Méot, A., Ferrand, L., & Bugajska, A. (2015). Sensory experience ratings (SERs) for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and visual word recognition. *Behavior Research Methods*, *47*(3), 813–825. doi: 10.3758/s13428-014-0503-x
- Borst, G., & Kosslyn, S. M. (2008). Visual mental imagery and visual perception: Structural equivalence revealed by scanning processes. *Memory & Cognition*, *36*(4), 849–862. doi: 10.3758/MC.36.4.849
- Bower, G. H. (1972). Mental imagery and associative learning. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory* (pp. 51–88). New York: John Wiley & Sons.
- Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M., & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory: Sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*(4), 1081–1088. doi: 10.1037/a0015537
- Buckner, R. L., & Wheeler, M. E. (2001). The cognitive neuroscience of remembering. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(9), 624–634. doi: 10.1038/35090048
- Campos, A. (2014). Gender differences in imagery. *Personality Individual Differences*, *59*, 107–111. doi: 10.1016/j.paid.2013.12.010
- Cumming, J., & Williams, S. E. (2012). The role of imagery in performance. In S. M. Murphy (Ed.), *Handbook of sport and performance psychology* (pp. 213–232). doi: 10.13140/2.1.3274.5925
- Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, *102*(1), 139–149. doi: 10.1016/j.cognition.2005.12.009
- Driskell, J. E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, *79*(4), 481–492. doi:10.1037/0021-9010.79.4.481

- Engelkamp, J., Seiler, K. H., & Zimmer, H. D. (2004). Memory for actions: Item and relational information in categorized lists. *Psychological Research*, *69*(1–2), 1–10. doi: 10.1007/s00426-003-0160-7
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*, 175-191
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, *41*, 1149-1160.
- Foglia, L., & O'Regan, J. K. (2016). A new imagery debate: enactive and sensorimotor accounts. *Review of Philosophy and Psychology*, *7*(1), 181–196. doi: 10.1007/s13164-015-0269-9
- Foley, M. A. (2012). Imagery encoding and false recognition errors: Exploring boundary conditions of imagery's enhancing effects. *Memory*, *20*(7), 700–716. doi:10.1080/09658211.2012.697172
- Foley, M. A., Hughes, K., Librot, H., & Paysnick, A. (2009). Imagery encoding effects on memory in the DRM paradigm: A test of competing predictions. *Applied Cognitive Psychology*, *23*(6), 828–848. doi:10.1002/acp.1516
- Foley, M. A., Wozniak, K. H., & Gillum, A. (2006). Imagination and false memory inductions: Investigating the role of process, content and source of imaginations. *Applied Cognitive Psychology*, *20*(9), 1119–1141. doi:10.1002/acp.1265
- Fulford, J., Milton, F., Salas, D., Smith, A., Simler, A., Winlove, C., & Zeman, A. (2018). The neural correlates of visual imagery vividness – An fMRI study and literature review. *Cortex*, *105*, 26–40. doi: 10.1016/j.cortex.2017.09.014
- Glisky, M. L., Williams, J. M., & Kihlstrom, J. F. (1996). Internal and external mental imagery perspectives and performance on two tasks. *Journal of Sport Behavior*, *19*(1), 3. Retrieved from <https://www.questia.com/library/journal/1G1-20825967/internal-and-external-mental-imagery-perspectives>
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology*, *66*(3), 325–331. doi: 10.1111/j.2044-8295.1975.tb01468.x

- Guillot, A., & Collet, C. (2005). Duration of mentally simulated movement: A review. *Journal of Motor Behavior*, *37*(1), 10–20. doi: 10.3200/JMBR.37.1.10-20
- Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2009). Brain activity during visual versus kinaesthetic imagery: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, *30*, 2157–2172. doi: 10.1002/hbm.20658
- Gupton, T., & Frincke, G. (1970). Imagery, mediational instructions, and noun position in free recall of noun-verb pairs. *Journal of Experimental Psychology*, *86*(3), 461–462. doi: 10.1037/h0030178
- Holmes, P. S., & Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology*, *13*(1), 60–83. doi: 10.1080/10413200109339004
- Juhasz, B. J., & Yap, M. J. (2013). Sensory experience ratings for over 5,000 mono- and disyllabic words. *Behavior Research Methods*, *45*(1), 160–168. doi: 10.3758/s13428-012-0242-9
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*(1), 47–60. doi:10.1037//0096-1523.4.1.47
- Kosslyn, S. M., & Thompson, W. L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychological Bulletin*, *129*(5), 723–746. doi:10.1037/0033-2909.129.5.723
- Lebon, F., Rouffet, D., Collet, C., & Guillot, A. (2008). Modulation of EMG power spectrum frequency during motor imagery. *Neuroscience Letters*, *435*(3), 181–185. doi: 10.1016/j.neulet.2008.02.033
- Lenhart, R. E., & Schwartz, S. M. (1983). Tactile perception and the right hemisphere: A masculine superiority for imagery coding. *Brain and Cognition*, *2*, 224–232. doi: 10.1016/0278-2626(83)90011-8
- Lorey, B., Bischoff, M., Pilgramm, S., Stark, R., Munzert, J., & Zentgraf, K. (2009). The embodied nature of motor imagery: The influence of posture and perspective. *Experimental Brain Research*, *194*(2), 233–243. doi: 10.1007/s00221-008-1693-1
- Marmurek, H. H. C., & Hamilton, M. E. (2000). Imagery effects in false recall and false recognition. *Journal of Mental Imagery*, *24*(1–2), 83–96.

- McCauley, M. E., Eskes, G., & Moscovitch, M. (1996). The effect of imagery on explicit and implicit tests of memory in young and old people: a double dissociation. *Canadian Journal Experimental Psychology*, *50*(1), 34–41. doi: 10.1037/1196-1961.50.1.34
- Metzger, R. L., & Antes, J. R. (1976). Sex and coding strategy effects on reaction time to hemispheric probes. *Memory and Cognition*, *4*, 167-171. doi: 10.3758/BF03213160
- Mueller, J. H., & Jablonski, E. M. (1970). Instructions, noun imagery, and priority in free recall. *Psychological Reports*, *27*(2), 559–566. doi: 10.2466/pro.1970.27.2.559
- Oliver, M. C., Bays, R. B., & Zabrocky, K. M. (2016). False memories and the DRM paradigm: Effect of imagery, list, and test type. *The Journal of General Psychology*, *143*(1), 33–48. doi:10.1080/00221309.2015.1110558
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Palmiero, M., Piccardi, L., Giancola, M., Nori, R., D’Amico, S., & Olivetti Belardinelli, M. (2019). The format of mental imagery: From a critical review to an integrated embodied representation approach. *Cognitive Processing*, *20*(3), 277–289. doi: 10.1007/s10339-019-00908-z
- Pressley, M., & Brewster, M. E. (1990). Imaginal elaboration of illustrations to facilitate fact learning: Creating memories of Prince Edward Island. *Applied Cognitive Psychology*, *4*(5), 359–369. doi: 10.1002/acp.2350040502
- Richardson, J. T. E. (1995). Gender differences in the Vividness of Visual Imagery Questionnaire: A meta-analysis. *Journal of Mental Imagery*, *19*(3-4), 177–187
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., & Bringer, J. (2008). Movement imagery ability: Development and assessment of a revised version of the Vividness of Movement Imagery Questionnaire. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *30*(2), 200–221. doi:10.1123/jsep.30.2.200
- Robin, F., & Mahé, A. (2015). Effects of Image and Verbal Generation on False Memory. *Imagination Cognition and Personality*, *35*(1), 26–46. doi: 10.1177/0276236615574488
- Rogers, T. B. (1977). Self-reference in memory: Recognition of personality items. *Journal of Research in Personality*, *11*(3), 295–305. doi: [10.1016/0092-6566\(77\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0092-6566(77)90038-1)
- Sajous, F., Hathout, N., & Calderone, B. (n.d.). *GlàffOLI* [browser]. Retrieved from <http://redac.univ-tlse2.fr/glaffoli/search/index.jsp>

- Santarpia, A., Blanchet, A., Poinso, R., Lambert, J.-F., Mininni, G., & Thizon-Vidal, S. (2008). Evaluating the vividness of mental imagery in different French samples. *Pratiques Psychologiques, 14*(3), 421–441. doi: 10.1016/j.prps.2007.11.001
- Schwoebel, J., Friedman, R., Duda, N., & Coslett, H. B. (2001). Pain and the body schema : Evidence for peripheral effects on mental representations of movement. *Brain, 124*(10), 2098–2104. doi: 10.1093/brain/124.10.2098
- Senkfor, A. J., Van Petten, C., & Kutas, M. (2002). Episodic action for real objects: An ERP investigation with perform, watch, and imagine action encoding tasks versus a non-action encoding task. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(3), 402–419. doi: 10.1162/089892902317361921
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science, 171*(3972), 701–703. doi:10.1126/science.171.3972.701
- Siakaluk, P. D., Pexman, P. M., Aguilera, L., Owen, W. J., & Sears, C. R. (2008). Evidence for the activation of sensorimotor information during visual word recognition: The body–object interaction effect. *Cognition, 106*(1), 433–443. doi:10.1016/j.cognition.2006.12.011
- Sigiru, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*(7), 910–919. doi: 10.1162/089892901753165827
- Thomas, N. J. T. (1999). Are theories of imagery theories of imagination? An active perception approach to conscious mental content. *Cognitive Science, 23*(2): 207–245. doi: 10.1016/S0364-0213(99)00004-X
- Thomas, N. J. T. (2014). *Mental imagery*. Retrieved from <https://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery>
- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review, 80*(5), 352–373. doi: 10.1037/h0020071
- Weinberg, R. (2008). Does imagery work? Effects on performance and mental skills. *Journal of Imagery Research in Sport and Physical Activity, 3*(1). doi: 10.2202/1932-0191.1025
- Willems, R. M., Toni, I., Hagoort, P., & Casasanto, D. (2009). Body-specific motor imagery of hand actions: Neural evidence from right- and left-handers. *Frontiers in Human Neuroscience, 3*. doi: 10.3389/neuro.09.039.2009

Zdrzilova, L., & Pexman, P. M. (2013). Grasping the invisible: Semantic processing of abstract words. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(6), 1312–1318. doi: 10.3758/s13423-013-0452-x

CHAPITRE 2 : LE RÔLE DU CONTEXTE DANS L'EFFET MNÉSIQUE DE L'IMAGERIE MENTALE

Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (en révision). Context matters for memory: Imagining situated actions to retain words. *Memory & Cognition*

Cet article a été soumis le 2 juillet 2023 pour révision dans Memory & Cognition, édité par Springer.

Le premier article a montré que l'imagerie mentale était un moyen efficace pour mémoriser de l'information verbale. Plus particulièrement, l'imagerie mentale motrice à la première personne, c'est-à-dire s'imaginer agir sur l'objet à apprendre d'un point de vue interne, était une forme optimale d'imagerie par rapport à l'imagerie visuelle et l'imagerie motrice à la troisième personne (i.e., en se regardant de l'extérieur de son corps). Sur cette base, une autre piste a alors été cherchée dans littérature sur la cognition incarnée afin de faire de l'imagerie mentale une meilleure stratégie mnésique. Cette piste a été trouvée du côté de la littérature sur la nature située de la cognition et de la mémoire. Le rôle des éléments moteurs est certainement important dans la mémoire et, par extension, dans la mémorisation via l'imagerie mentale, mais un aspect essentiel à considérer est le lien entre les processus moteurs et le contexte dans lequel ils se produisent. En effet, lorsqu'un individu fait de l'imagerie mentale, cette imagerie s'inscrit dans un contexte (une situation) plus ou moins clair et détaillé. Ce contexte peut donc interférer avec les actions imaginées et par extension influencer les bénéfices que la mémoire peut tirer de l'imagerie mentale.

Une revue de Yeh et Barsalou (2006) met en évidence un nombre considérable de travaux qui soulignent les effets situationnels sur le traitement conceptuel et la mémoire. Par exemple, les personnes ont une meilleure performance mnésique si l'environnement d'apprentissage original est rétabli lors de la récupération (Godden & Baddeley, 1975 ; Smith et al., 1978), même s'il s'agit d'un environnement imaginé (Smith, 1979). L'élément situationnel qui facilite la récupération de l'item lorsqu'il est présent au moment de la récupération peut également être une posture (Dijkstra et al., 2007) ou un stimulus sensoriel précédemment associé (Brunel et al., 2009).

Ainsi, si nous supposons que la cognition est incarnée et qu'elle repose sur des simulations multimodales, ces simulations doivent être ancrées dans des situations, ce qui indique que la cognition est située. Une fonction potentiellement primaire de la cognition est

de servir l'action dans des situations spécifiques, car son objectif principal est de permettre une interaction efficace avec le monde réel (Barsalou et al., 2018). Par conséquent, le cerveau s'engagerait automatiquement dans la simulation de situations en amont de l'action réelle pour faciliter la mise en place d'actions appropriées dans le monde physique et dans des circonstances particulières. Action et contexte sont donc intrinsèquement liés, c'est pourquoi se focaliser uniquement sur les aspects moteurs est insuffisant pour comprendre les effets de l'incarnation sur la mémoire et l'efficacité de l'imagerie incarnée. L'objectif de cet article était donc de débloquer le plein potentiel des actions en les intégrant dans leur cycle de d'action située.

Expérience 1

Dans une première expérience, nous avons comparé quatre groupes, un groupe contrôle de répétition mentale, un groupe d'imagerie visuelle, un groupe d'imagerie motrice et un groupe d'imagerie motrice située. Nous nous attendions à ce que ce dernier groupe, de par sa dimension située, surpasse tous les autres en termes de performance mnésique.

Nous avons alors construit un protocole d'apprentissage incident (il n'était pas explicitement indiqué aux participants de mémoriser), en ligne via la plateforme Qualtrics. Pour chacun des 20 mots présentés, les participants devaient faire une tâche mentale pendant 7 secondes, puis répondre à deux questions sur ces tâches pendant 15 secondes. Un test de rappel libre était ensuite administré, suivi d'un test de reconnaissance. Enfin, pour contrôler le niveau d'habileté d'imagerie mentale de chacun, ils devaient passer le *Vividness of Visual Imagery Questionnaire*. Nous avons comparé l'efficacité mnésique d'une stratégie de répétition mentale, d'imagerie visuelle, d'imagerie motrice et d'imagerie motrice située. Les 226 participants devaient soit :

- Pour le groupe de répétition mentale, répéter mentalement chaque mot présenté puis rapporter les caractéristiques phonologiques du mot (nombre de syllabes et s'il rime avec un mot spécifique) ;
- Pour le groupe d'imagerie visuelle, faire une image mentale de chaque objet auquel se référait chaque mot et rapporter certaines caractéristiques visuelles de cette image (forme et couleur) ;
- Pour le groupe d'imagerie motrice, imaginer qu'ils lançaient chaque objet auquel se référait chaque mot devant eux et rapporter diverses caractéristiques physiques de cette interaction mentale (la force et la prise, une prise de précision ou une prise de force, nécessaires pour le lancer dans leur imagination) ;
- Pour le groupe d'imagerie motrice située, imaginer une situation dans laquelle ils lançaient chaque objet auquel se référait chaque mot à un ami dans un endroit cohérent avec l'objet. Après cela, ils devaient rapporter différentes caractéristiques de

la situation imaginée (la force nécessaire pour lancer et l'endroit imaginé). Pour cette condition, les participants devaient imaginer une situation et les différents éléments qui la composent, tels que définis dans Barsalou et al. (2018), c'est-à-dire avec un cadre, des agents, un but, des actions, etc, afin d'activer le cycle de l'action située (Barsalou, 2020).

Le principal résultat de cette étude est que le type de stratégie avait un effet significatif sur le rappel libre, l'imagerie motrice située produisant le plus de rappels corrects. Ceci est en accord avec la nature incarnée et située de la mémoire. La mémoire semble soutenir l'action située, car les traces de mémoire qui soutiennent explicitement une action située sont plus faciles à récupérer que les traces qui sont moins utiles pour servir une action située.

Lors des analyses au niveau des items, il est apparu que les caractéristiques psycholinguistiques des mots (concrétude, intensité et valence émotionnelle, fréquence dans la langue française, longueur des mots, scores d'expérience sensorielle et d'interaction corps-objet) avaient des effets différents selon les groupes. Plus précisément, ces résultats reflétaient le fait que les participants se représentaient davantage le référent des mots dans les conditions d'imagerie que dans le groupe de contrôle. De plus, l'imagerie motrice située semblait spécifiquement favoriser le rappel des mots les plus sensoriels (i.e., hauts scores d'expérience sensorielle) et les plus manipulables (i.e., hauts scores d'interaction corps-objet). Ceci apporte des preuves supplémentaires que les participants se sont effectivement imaginés en train d'interagir physiquement avec des objets et que les bénéfices en termes de mémoire dans le groupe d'imagerie motrice située étaient effectivement dus à la nature sensori-motrice de ces processus engagés.

Expérience 2

Dans une seconde étude, nous avons investigué le rôle de la distinctivité inter-item dans cet effet mnésique de l'imagerie mentale. La condition d'imagerie motrice située, telle qu'elle a été construite dans notre étude, présentait un niveau relativement élevé de distinctivité inter-items pour les lieux imaginés, ce qui en fait de bons indices de récupération. Par exemple, pour le mot "marteau", si les participants se sont imaginés jeter un marteau dans leur garage, au moment du rappel, ils peuvent se souvenir de l'emplacement du garage, ce qui peut les aider à se rappeler de l'image qu'ils ont formée pour le "marteau" au cours de la phase d'étude. Au contraire, l'imagerie motrice située avait un niveau de distinctivité relativement faible pour la composante motrice, parce que chaque objet était associé à la même action de lancer. Ce manque de distinctivité dans la composante motrice pouvait avoir atténué les bénéfices de l'imagerie motrice située. Nous avons donc cherché à moduler les performances mnésiques en augmentant le caractère distinctif de la composante motrice de l'imagerie motrice située, ou en diminuant le caractère distinctif de la composante située.

La procédure et matériel étaient les mêmes que dans la première expérience, la seule différence étant qu'il y avait deux groupes expérimentaux. Un premier groupe avait reçu pour instruction de s'engager dans une imagerie motrice située avec des actions distinctives mais des lieux non distinctifs (IM+S), tandis que l'autre groupe devait faire une imagerie motrice située avec des actions et des lieux distinctifs (IM+S+). Les participants du groupe IM+S ont été invités à imaginer une situation dans laquelle ils montraient l'utilisation de chaque objet à un ami en *un seul endroit pour tous les objets présentés*. Ils devaient générer cet endroit au début de l'expérience et l'écrire. Cet endroit leur était rappelé à chaque essai. Ils devaient ensuite rapporter les caractéristiques de la situation imaginée (c'est-à-dire la difficulté à démontrer l'action d'utilisation et la cohérence de l'endroit imaginé avec chaque objet). Les participants du groupe IM+S+ ont également été invités à imaginer une situation dans laquelle ils montraient l'utilisation de chaque objet à un ami, mais dans *un lieu cohérent avec chaque objet*. Ils devaient ensuite rapporter les caractéristiques de la situation imaginée (c'est-à-dire la difficulté à démontrer l'action d'utilisation et l'emplacement imaginé). Nous comparions ces deux nouvelles conditions à la condition d'imagerie motrice située de la première expérience, qui était donc une condition avec des actions non-distinctives mais des lieux distinctifs (IMS+).

Les résultats montrent que, contrairement à notre hypothèse, IM+S+ n'était pas meilleur que IMS+ de la première étude, à la fois en termes de performance de rappel et de performance de reconnaissance. La transformation de l'action imaginée en une caractéristique plus discriminante n'a pas aidé à la mémorisation. De la même manière, IM+S+ n'était pas plus efficace que IM+S ; en d'autres termes, le fait de rendre les situations imaginées plus distinctives n'a pas aidé les participants à mémoriser les mots. En résumé, il semblerait que ni la distinctivité motrice ni la distinctivité situationnelle n'ait eu d'impact sur la performance mnésique. Cette absence d'impact peut s'expliquer par la façon dont nous avons opérationnaliser la distinctivité dans cette étude. Cette expérience a donc échoué à nous aider à déterminer dans quelle mesure les éléments situationnels et moteurs doivent être distinctifs pour être considérés comme des indices de récupération utiles. Cela suggère que si les processus de mémoire incarnée et située peuvent améliorer la récupération, le niveau spécifique de distinction requis pour une performance optimale de la mémoire reste incertain.

Context Matters for Memory: Imagining Situated Actions to Retain Words

Quentin Marre, Nathalie Huet, and Elodie Labeye

CLLE Laboratory, University of Toulouse Jean Jaurès, Toulouse, France

Abstract

There is a growing consensus that memory retrieval involves reenacting sensorimotor experiences from the encoding phase. Multimodal motor imagery, such as imagining oneself acting on items to be learned, has been proven to be more effective than non-motor memory strategies. However, the mental context in which the imagined actions occurs must be considered. The study investigates the importance of situational, goal-oriented processing in memory and compares different memory strategies. Two hundred and twenty-six participants were given instructions for incidental learning: mental rehearsal, visual imagery, motor imagery, or situated motor imagery. Situated motor imagery, which involved imagining physical interaction with an item within a coherent situation, produced the highest proportion of correct recalls. This suggests that memory is embodied and supports situated action. Furthermore, item-level analysis showed that individuals who engaged in situated motor imagery remembered words primarily due to the sensorimotor characteristics of the words' referent. However, a second study investigating the role of inter-item distinctiveness in this effect failed to determine the extent to which the situational and motor elements need to be distinctive in order to be considered useful retrieval cues. This suggests that while the embodied and situated memory processes may enhance retrieval, the specific level of distinctiveness required for optimal memory performance remains uncertain. Further research is needed to explore the relationship between distinctiveness, situated and embodied memory processes in order to fully understand their interplay and implications for memory encoding and retrieval.

Keywords: embodied and situated cognition, memory strategies, mental imagery, word processing

The literature on strategies for optimizing memorization processes shows that the use of mental imagery during the encoding of information results in better memorization, compared with encoding without imagery. Mental imagery can either be *visual* (i.e., visualizing shapes of objects, color, brightness) or involve other senses (e.g., auditory or olfactory). Mental imagery can also be *motor* imagery (MI), that is, the mental reproduction of physical activity without any actual movement (Driskell et al., 1994). This is also referred to as *kinesthetic* imagery when it involves the sensation of executing a movement, feeling the contraction and stretching of the muscles and the position of the limbs relative to each other (Cumming & Williams, 2012; Guillot et al., 2009).

Concerning the precise impact of mental imagery on the memorization process, early research on mental imagery showed that *visual imagery* (VI) favors the recall of words, compared with conditions where no imagery is used, especially when the words are highly imageable (e.g., Bower, 1972; Gupton & Frincke, 1970; McCauley et al., 1996; Mueller & Jablonski, 1970; Paivio, 1971; Pressley & Brewster, 1990). These findings have been supported by more recent studies, which have shown that participants who are given an imagery instruction (compared with others who are told not to use imagery) correctly recall or recognize more items (Maraver et al., 2021; Oliver et al., 2016) and produce fewer false memories (Foley, 2012; Foley et al., 2009; Foley et al., 2006; Maraver et al., 2021; Robin & Mahé, 2015). *MI* affords the same memory benefits, as it favors the free recall of action sentences (i.e., form of enactment effect; Engelkamp, 1995), compared with verbal encoding (i.e. reading), as well as the free recall of object nouns (Marre et al., 2021). However, this enactment benefit is only observed when the words are encoded with meaningful actions (Sivashankar & Fernandes, 2021). This effect has also been observed when actions are not explicitly imagined but planned. Kinder and Buss (2020) found that items encoded with motor execution were better recognized than items encoded with motor preparation (i.e., mental motor simulation), which in turn were better recognized than in the baseline condition with neither motor execution nor preparation.

Embodied Cognition Framework

The positive impact of mental imagery on memory is well explained by the *embodied cognition* framework. The general assumption shared by all embodied approaches is that high-level cognitive processes are grounded in our bodily experiences and cannot be detached from the peripheral brain systems that process input from the outside world. One such embodied approach, known as *simulation theory*, states that the brain captures modal states during perception, action, and introspection, and subsequently simulates these states to represent knowledge (e.g., Barsalou, 2008; Gallese, 2005; Hesslow, 2012). Cognition is viewed as relying on the partial reenactment of lived experiences (Barsalou, 1999; Barsalou et al., 2003). It

should be noted that simulations are, for the most part, unconscious, whereas mental imagery is an instance of conscious, intentional simulation. This approach implies that memory retrieval consists of the multimodal simulation of the encoding experience; the reenactment of perceptual, motor and introspective experiences that occurred during the encoding phase. The embodied nature of memory has been demonstrated in a number of studies, which found that encoding in long-term memory involves the integration of sensorimotor activations (while experiencing the current situation), and retrieval the reenactment of a particular pattern of sensorimotor and emotional experiences (Brouillet et al 2016; Brunel et al., 2009, Guérard et al., 2015; Pezzulo et al., 2010; Versace et al., 2014). A large body of empirical evidence in favor of these embodied models of memory can be found in Iani (2019).

On the neurophysiological level, similar sensory cortices appear to be activated during an experience and during the retrieval of that experience (for reviews, see Buckner & Wheeler, 2001; Danker & Anderson, 2010). In the same way, mental imagery is functionally equivalent to sensory perception (Albers et al., 2013; Dijkstra et al., 2020; Harrison & Tong, 2009; Kosslyn et al., 1978; Kosslyn & Thompson, 2003; Pearson, 2019; Serences et al., 2009; Shepard & Metzler, 1971), and MI to real-life action (Cummings & Williams, 2012; Lorey et al., 2009; Sirigu & Duhamel, 2001). Experiencing or simulating therefore seems to be part of the same neural process, activating neuronal patterns that are partly identical.

The results of Marre, Huet, and Labeye (2021)'s study are in line with the embodied cognition framework, insofar as they show that the use of mental imagery has a positive impact on memorization. These authors also demonstrated that mental imagery can be more or less embodied, and that this has an impact on memorization processes. In a word retention task, (first-person) visuo-motor imagery produced better recall performance than VI, which in turn was more effective than mental rehearsal (MR). These results indicate that sensorimotor elements are prime retrieval cues, and the more embodied the mental imagery is at encoding, the greater the availability of these cues at retrieval, thus facilitating the retrieval of the memory trace. A study by Guérard et al. (2015) yielded similar conclusions. These authors found that pairs of objects evoking an action (e.g., a bottle and a glass in a congruent spatial arrangement) were more likely to be recalled than pairs that did not evoke any action (e.g., a bottle and a glass in an incongruent arrangement). This effect was caused by the additional motor dimension of these pairs, as it was not observed when participants had to perform a motor suppression task during encoding. The motor components of objects are therefore key factors for their memorization (Downing-Doucet & Guérard, 2014; Dutriaux & Gyselinck, 2016; Guérard & Lagacé, 2014). Furthermore, this resonates with the previously demonstrated role of action in word recall (Engelkamp et al., 2004; for the role of the cerebellum, see Gatti et al., 2020), picture recall (Senkfor et al., 2002), conceptual processing (Siakaluk et al., 2008), and second language acquisition (Macedonia et al., 2020).

Situatedness of cognition

The role of motor elements is certainly important in memory and, by extension, in memorization via mental imagery, however, an essential aspect to consider is the link between motor processes and the context in which they occur. If we assume that cognition is embodied, relying on multimodal simulations, then these simulations must be situationally grounded, indicating that cognition is situated. A potentially primary function of cognition is to support actions within specific situations, as its main purpose is to enable effective interaction with the real world (Barsalou et al., 2018). Consequently, the brain would automatically engage in the simulation of situations upstream to facilitate appropriate actions. Action and context are inherently intertwined, and therefore, focusing solely on motor aspects is insufficient for comprehending the embodiment effects on memory and the efficiency of embodied imagery, because when we imagine ourselves performing an action, it is very likely that we are imagining ourselves in a more or less specific context spontaneously.

A *situation* can be defined as a "region of perceived space that surrounds a focal entity over some temporal duration, perceived from the subjective perspective of an agent" (Yeh & Barsalou, 2006, pp. 352-353). It is composed of diverse situational elements from the external and internal world, such as a setting with agents interacting, objects, events, goals, affects, bodily states, actions, and outcomes (Barsalou et al., 2018). Cognition has to integrate all these situational elements to explain current situations, predict events from the environment, or produce actions targeted at specific outcomes. The resulting integrated elements are then stored in long-term memory to constitute *situated conceptualizations* or *situational memories* that can be used in subsequent processing. Cognitive processes are therefore always part of a situated action cycle (Barsalou, 2020).

Accordingly, if conceptual knowledge is described as *situated*, it means that when a concept is activated, it is simulated in the context of probable background situations. For example, when accessing knowledge about the object *chair*, the chair is simulated in the context of a kitchen (setting), with someone (agent) sitting (action) comfortably (affect) on it. In their linguistic and situated simulation system theory, Barsalou and Wiener-Hastings (2005) argued that a system that simulates situations is essential for processing meaning. Yeh and Barsalou (2006) pointed out in their review that a considerable number of studies have highlighted situational effects on conceptual processing and memory. For instance, people perform better if the original learning environment is reinstated at retrieval (Godden & Baddeley, 1975; Smith et al., 1978), even if it is an imagined environment (Smith, 1979). The situational element that facilitates performance when present at retrieval can also be posture (Dijkstra et al., 2007) or a previously associated sensory stimulus (Brunel et al., 2009).

Another fact about the situatedness of cognition is that concept meaning is context dependent. In other words, the nature of the information about the concept that is activated

depends on what is relevant for the current situation. For instance, in Barclay, Bransford, Franks, McCarrell, and Nitsch (1974)'s study, participants had to study sentences (e.g., "The man lifted the piano") and recall the critical noun in each one (here, *piano*). Participants performed better when they were cued with a salient characteristic of the concept in the sentence context (e.g., heavy) than when the cue was unrelated to the sentence context (e.g., *with a nice sound*, which does not represent the *piano* concept in this sentence).

Goals and Hypothesis

As argued above, there is a growing body of evidence in support of the idea that conceptual processing and memory are embodied and situated. The first goal of the present study was to consider both of these aspects. We predicted that a memory strategy emphasizing the embodied nature of cognition but also its situated aspect would be particularly effective. The embodied nature of memory has already been investigated in Marre et al. (2021) and other works presented above. The main goal here is to test the extent to which memory strategies should be situated. Strategies based on forms of mental imagery such as the MI tested in Marre et al. (2021) should be more memory effective when complemented by a coherent situated aspect / contextual information. If memory is designed to support situated action, it appears plausible that memory traces explicitly supporting this purpose should be easier to retrieve than traces that are less useful for supporting a situated action. In other words, the full mnemonic potential of actions can be deployed when integrating them in their situated action cycle.

It is all the more important to take these aspects into account in the context of work on mental imagery and memory. Most studies have so far compared one type of imagery with a condition with no imagery. In the present study, however, we went into a little more detail and tested several kinds of imagery strategies to assess the relative contribution of sensorimotor components to memory effectiveness.

We formed four instruction groups: MR (i.e., repeating each word in one's head), VI (i.e., creating a mental image of each item), MI (i.e., imagining a physical interaction with the item), and situated motor imagery (SMI; i.e., imagining a physical interaction with the item in a situation that is consistent with it).

Based on the literature on the memory benefits of imagery, we expected the MR group to perform more poorly than the other three imagery groups (Bower, 1972; Gupton & Frincke, 1970; Maraver et al., 2021; McCauley et al., 1996; Mueller & Jablonski, 1970; Oliver et al., 2016; Paivio, 1971; Pressley & Brewster, 1990). We also expected the VI group to perform more poorly than the MI group, owing to the motor benefits highlighted by Marre et al. (2021). Finally, we predicted that the SMI group would be the optimal form of mental imagery and

would perform better than the MI group, owing to the additional situated aspect of the imagery evoked earlier.

The second goal of this study was a more exploratory one. We planned to analyze how the psycholinguistic characteristics of each word (e.g., concreteness, emotional valence, or frequency in the French language) interfered with the efficacy of the different memory strategies. One type of strategy may be particularly effective for a certain type of word. We expected concreteness, sensory experience and body-object interaction to influence the ease of imagining the items, and, therefore, the memory benefits of imagery strategies. We also considered context availability (i.e., availability of associated contextual information in memory for a specific word) for the same reasons, assuming that it modulates the ease of creating mental images, especially in SMI. Moreover, there is an extensive body of literature concerning the emotional characteristics (e.g., arousal and valence) of words and how they may affect their memorization (e.g., Harris & Pashler, 2005; Kensinger, 2009; Levine & Edelstein, 2009; Mather & Sutherland, 2009; Mickley et al., 2010). These subjective variables, as well as lexical variables such as frequency and word length (i.e., number of letters) have been found to play a major role in recognition and free recall performances (Lau et al., 2018).

Study 1

Method

Participants

We randomly assigned 226 (197 women and 29 men) participants to the four encoding instruction groups: MR ($n = 61$), VI ($n = 51$), MI ($n = 53$), and SMI ($n = 62$). Individuals aged under 18 or over 50 years were excluded, as were individuals who did not speak French fluently or who had taken psychotropic substances (i.e., drugs that could cause memory dysfunction, such as benzodiazepines). Participants' mean age was 28.7 ($SD = 8.51$, range = 18-50). Participants were recruited via social media groups (student and community groups). They all volunteered to take part in the research and gave their informed consent online. Those who were studying at the University of Toulouse Jean-Jaurès could earn credits for a methodology course. This research project was approved by the Research Ethics Committee of Toulouse University.

To know whether the number of participants was sufficient for the desired statistical power, we ran simulation-based power analyses for binomial mixed models with the *mixedpower* R package (version 0.1.0, Kumle et al., 2021), using data from Marre et al., 2021 (a dataframe version where the recall performance is organized word-wise, available in the Supplemental Material). We made a binomial mixed model with the instructions as predictor and the word recall as the outcome variable and specified the three contrasts required for our

comparisons. We then simulated 1000 times the achieved power for several sample sizes. A total sample size of 90 participants was required to achieve a power of at least .80 for most of our planned comparisons. Our present sample size exceeded this a priori sample size. However, a sample size of 400 participants was required to compare the recall performance in MI with VI (to achieve a power of .80). Due to time constraints, we were only able to recruit up to 226 participants, which corresponds to an a priori power of .60.

Procedure

The experiment was anonymous and conducted entirely online. First, participants gave their informed consent, by selecting the corresponding option after reading information about the experiment and their rights. Second, they underwent a training phase, in which they were given one of four instructions:

- Participants in the MR group were asked to mentally repeat each word they read and then report its phonological characteristics (i.e., number of syllables and whether it rhymed with a specific word);
- Participants in the VI group were asked to create a mental image of each object and to report the visual characteristics of this image (i.e., shape and color);
- Participants in the MI group were asked to imagine throwing each object in front of them and to report the physical characteristics of this mental interaction (i.e., force and precision/power grip needed for throwing);
- Participants in the SMI group were asked to imagine a situation where they threw each object to a friend in a place that was coherent with the object. They then had to report the characteristics of the imagined situation (i.e., force needed for throwing and imagined location). In this condition, participants had to imagine a situation and its various components, as defined in Barsalou et al. (2018), including the setting, agents, goal and actions, in order to activate the situated action cycle (Barsalou, 2020).

This part of the procedure is illustrated in Figure 1.

Participants then saw 10 practice words. For each word, they had 7 s to perform the mental task described in the instruction, and 15 s to write down the required information about the task (details of the instructions are provided in Supplemental Material). They were not asked to recall the words after this training phase. The experimental phase was presented in exactly the same way as the training phase, except that it featured 20 words. Two sets of word lists were created. Participants had a one in two chance of seeing Training list 1 followed by Experimental list 1, or Training list 2 followed by Experimental list 2. The word lists are available in Supplemental Material.

After completing the experimental phase, participants had to recall the words they had just seen. They were not informed in advance of this free recall test. The 20-word experimental

phase therefore constituted an incidental learning task. In a subsequent recognition test, participants were shown a set of 29 words, and had to indicate (yes/no answer) whether each one had previously been shown to them. There were eight old words and 21 distractors. We analyzed the number of correctly recognized words and the number of false recognitions to assess memory performance. Participants then completed the French Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ; Santarpia et al., 2008), to probe their ability to create vivid mental images. Finally, participants were debriefed.

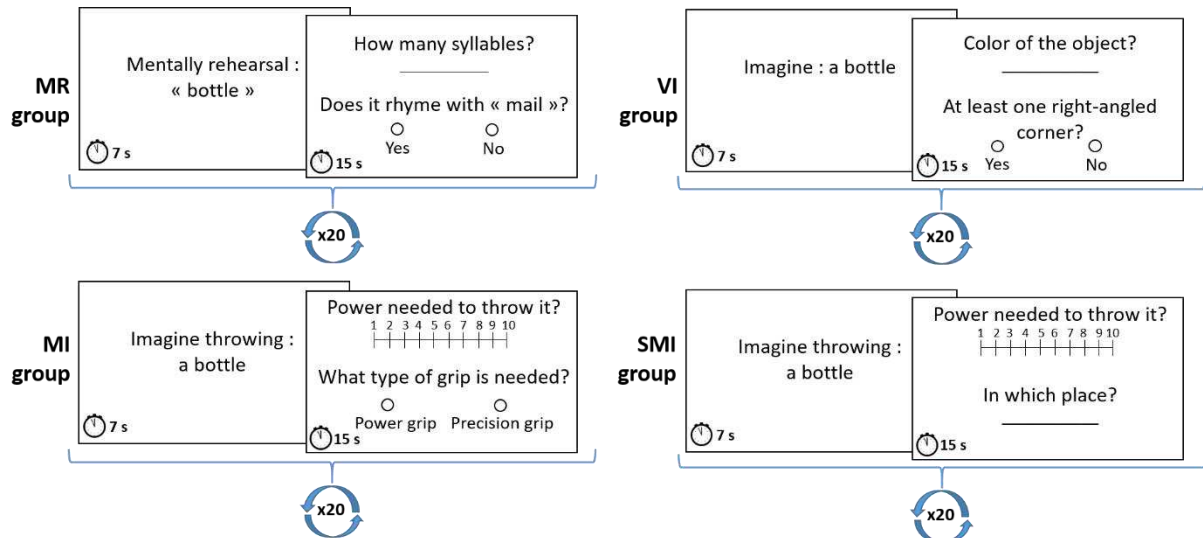


Figure 2. Schematic representation of the incidental learning task for each of the four groups. In the experimental phase, participants saw these two screens 20 times, as there were 20 words.

Material

The whole experiment was created using Qualtrics. There were two experimental word lists. The referents of these words had to be nonliving and capable of being manipulated in MI. They therefore had to have relatively high concreteness levels, sensory experience ratings, and body-object interaction scores. *Sensory experience ratings* refer to the degree to which a word triggers sensory and perceptual experiences (Juhász & Yap, 2013), and we used the norms collected by Bonin, Méot, Ferrand and Bugajska (2015). *Body-object interaction* scores reflect the ease with which a human body can physically interact with a word's referent (Siakaluk et al., 2008), and we used the data collected by Pexman, Muraki, Sidhu, Siakaluk, and Yap (2019). For each word, other variables were taken into account, including concreteness, context availability, emotional valence, and arousal, based on the norms established by Bonin, Meot, and Bugajska (2018) and Bonin et al. (2003). Word frequency was collected using the GlàffOLI web interface with the FrWaC corpus (Hathout et al., 2014). We ensured that the two experimental lists were equivalent on all these variables.

The VVIQ (Santarpia et al., 2008) consists of 32 visual scenes to imagine. For each one, respondents have to indicate the vividness of their image on a scale ranging from 1 (*No image is visible*) to 5 (*The image is perfectly clear, as sharp and precise as a real perception*).

Results

We analyzed the data of 226 participants using R software (v.4.2.1; R Core Team, 2022) using binomial mixed regression models with contrasts for the specific comparisons mentioned in our hypotheses using the lme4 R package (v. 1.1-33, Bates et al., 2015). We excluded observations where participants did not respond to the two questions of the incidental learning task. The R code for these analyses can be found in Supplemental Material.

Free Recall

To test the impact of instructions on the recall performance, we built a binomial mixed model (using the glmer function) with this structure: $\text{recall} \sim \text{instruction} + (1|\text{participant}) + (\text{instruction}|\text{word})$. This model was built by gradually adding fixed and random effects within the limits of what our hypotheses allowed and avoiding keeping variables that did not play a significant role. In particular, we did not keep the VVIQ score as it played a negligible role in explaining the recall performance (as already found in Marre et al., 2021). Then, we applied three contrasts using emmeans (v. 1.8.6, Lenth, 2023) and contrasts (stats package, v. 4.2.1, R Core Team, 2022) functions corresponding to our three planned comparisons stated in the hypotheses (*i.e.*, a first contrast comparing SMI with other imagery groups, a second comparing the three imagery groups with MR control group and a third one comparing MI and VI). We used a Holm-Bonferroni correction to control the family-wise error rate. The SMI instruction was found to increase the chances to recall a word compared the other imagery groups, $OR = 1.37 [.988; 1.89]$, $SE = .137$, $p = .043$. Moreover, the three imagery groups had a larger probability of recall than the MR group, $OR = 2.72 [1.92; 3.85]$, $SE = .40$, $p < .001$. Finally, we failed to find a significant difference between MI and VI, $OR = .80 [.54; 1.20]$, $SE = .14$, $p = .194$.

Table 1*Descriptive Statistics for Memory Performances as a Function of Encoding Instruction*

| | MR | VI | MI | SMI |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|
| Proportion of correct recalls | .32 | .52 | .47 | .57 |
| Proportion of correct recognitions (hits)* | .84 | .98 | .94 | .94 |
| Proportion of false recognitions (false alarms)** | .05 | .02 | .04 | .03 |
| Median detection sensitivity (d')*** | 2.59 | 3.47 | 2.96 | 3.12 |

Note. MR = mental rehearsal; VI = visual imagery; MI = motor imagery; SMI = situated motor imagery.

* Proportion of "yes" responses for items presented in the learning phase. ** Proportion of "yes" responses for items not presented in the learning phase. *** z value of the proportion of hits minus z value of the proportion of false-alarms.

Recognition

A second binomial mixed model for the correct recognitions ("yes" responses to old words) was built using the same method as the free recall model and the same contrasts. We used this model with recognition (yes/no) as the outcome, fixed effects for the instruction and recognition times and random intercepts for the participant and word variables: $\text{corr_reco} \sim \text{instruction} + \text{corr_reco.rt} + (1|\text{participant}) + (1|\text{word})$. It appears that participants in three imagery groups had more chances to recognize correctly a word as an old one compared with mental rehearsal, $OR = 4.28 [2.12; 8.63]$, $SE = 1.25$, $p < .0001$ (see Table 1). No significant difference were found for the other comparisons between SMI and other imagery groups, $OR = .58 [.23; 1.46]$, $SE = .22$, $p = .161$, and MI and VI, $OR = .33 [.10; 1.16]$, $SE = .17$, $p = .071$.

For false recognitions ("yes" responses to new distractor words), the same type of model has been constructed: $\text{false_reco} \sim \text{instruction} + \text{false_reco.rt} + (1|\text{participant}) + (1|\text{word})$. The three imagery groups were found to inhibit incorrect recognitions of new words compared with mental rehearsal, $OR = .47 [.25; .91]$, $SE = .13$, $p = .019$. No difference was detected between imagery groups, neither between SMI and other imagery types, $OR = 1.13 [.52; 2.48]$, $SE = 0.37$, $p = 0.708$, nor between MI and VI, $OR = 2.29 [0.88; 5.97]$, $SE = .92$, $p = .076$.

Finally, we performed a signal detection analysis using the *dprime* function of the *psycho* R package (version 0.6.1, Makowski, 2018) to compute d' (difference between the z value of the proportion of hits and z value of the proportion of false-alarms). As assumptions were not met for a parametric test, a Kruskal-Wallis test and Dwass-Steel-Critchlow-Fligner post-hoc tests⁶ was performed, with d' as dependent variable and group as independent variable. It revealed an effect of instructions on d' , $\chi^2(3) = 34.5$, $p < .0001$, $\varepsilon^2 = .156$. More precisely, d' for imagery groups was higher than in the mental rehearsal group ($p = .001$ for SMI vs MR; $p = .013$ for MI vs MR, $p > .001$ for VI vs MR). Participants in the imagery groups were more sensitive to the difference between old words and new words, they manage to discriminate them more easily.

Influence of Word Characteristics

For exploratory purposes, we tested whether psycholinguistic variables influenced the odds of recalling a word. We built five models, the first considering all participants, and each of the four others considering participants in one of the groups. These models included lexical variables (i.e., log-frequency, word length), subjective variables (i.e., concreteness, context availability, arousal, valence, body-object interaction, sensory experience ratings), the serial position of the word along with its quadratic version (as the effect of serial position is known to have a quadratic relationship with recall), and VVIQ scores as predictors, and word recall (yes/no) as the outcome variable. As a model with random slopes can lead to convergence issues, owing to an overly complex random effect structure, we chose to run models with only random intercepts for words and participants. As shown in Table 2, when considering all the participants, there was a significant regression coefficient for serial position, sensory experience ratings and body-object interaction, meaning that these variables positively predicted the odds of a word being recalled, when controlling for the effects of the other variables. More specifically, serial position had both a linear and a quadratic relationship with recall performance, meaning that the first words in the list were recalled less than those at the end of list (linear relationship), while the first and last words were more often recalled than those in the middle, resulting in a U-shaped (quadratic) relationship. Standardized estimates indicated that serial position was most predictive of recall performance.

⁶ No mixed model were performed here as the data set structure changes to calculated d' . This data set lost its hierarchical structure with 20 words rows for each participant. Here, there is only one data point by participant.

Table 2*Binomial Mixed Effects Regression Results the whole sample*

| <i>Predictors</i> | Recall (whole sample) | |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | <i>Odds Ratios</i> | <i>Standardized estimates</i> |
| (Intercept) | 0.60 [0.49; 0.75]*** | -0.50 |
| Serial position | 2.36 [1.81; 3.09]*** | 0.86 |
| Serial position ² | 4.86 [2.76; 8.57]*** | 1.58 |
| Log-frequency | 0.95 [0.77; 1.17] | -0.05 |
| Word length | 0.90 [0.67; 1.21] | -0.10 |
| Concreteness | 1.12 [0.81; 1.54] | 0.11 |
| Context availability | 1.04 [0.77; 1.39] | 0.04 |
| Arousal | 1.16 [0.82; 1.65] | 0.15 |
| Valence | 1.27 [0.86; 1.86] | 0.24 |
| SER | 1.41 [1.08; 1.85]* | 0.36 |
| BOI | 1.46 [1.05; 2.04]* | 0.38 |
| VVIQ | 0.88 [0.68; 1.13] | -0.13 |

Notes. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

When we looked at the performances of the MR group, as shown in Table 3, only serial position and squared serial position remained significant. For the VI group, the serial position predictors followed the same pattern as for the whole sample and the MR group, except that valence was a significant predictor this time. In the MI group, the two serial position predictors predicted the odds of recall, but this time sensory experience ratings represented a significant predictor of the recall performance. Finally, for the SMI group, the serial position predictors were once again significant predictors, but more interestingly, body-object interaction scores and sensory experience ratings were also significant predictors. More detailed mixed-effects models results including p values and statistics for the random effects can be found in Supplemental Material.

Table 3*Binomial Mixed Effects Regression Results for each group*

| <i>Predictors</i> | Recall (MR group) | | Recall (VI group) | | Recall (MI group) | | Recall (SMI group) | |
|------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | <i>Odds Ratios</i> | <i>Std. est.</i> | <i>Odds Ratios</i> | <i>Std. est.</i> | <i>Odds Ratios</i> | <i>Std. est.</i> | <i>Odds Ratios</i> | <i>Std. est.</i> |
| (Intercept) | 0.27*** [0.19; 0.39] | -1.30 | 0.67** [0.51; 0.87] | -0.4 | 0.65* [0.44; 0.95] | -0.43 | 1.04 [0.77; 1.39] | 0.04 |
| Serial position | 2.73*** [1.73; 4.30] | 1.00 | 2.37*** [1.65; 3.42] | 0.86 | 2.41*** [1.45; 4.01] | 0.88 | 1.93*** [1.40; 2.67] | 0.66 |
| Serial position ² | 6.27*** [2.32; 16.95] | 1.84 | 7.47*** [3.41; 16.36] | 2.01 | 4.29** [1.47; 12.51] | 1.46 | 3.07** [1.56; 6.05] | 1.12 |
| Log-frequency | 0.85 [0.56; 1.27] | -0.17 | 1.08 [0.74; 1.58] | 0.08 | 1.82 [0.53; 1.27] | -0.20 | 1.06 [0.76; 1.48] | 0.06 |
| Word length | 0.80 [0.48; 1.33] | -0.23 | 0.86 [0.58; 1.28] | -0.15 | 0.89 [0.51; 1.57] | -0.11 | 1.06 [0.75; 1.50] | 0.05 |
| Concreteness | 1.06 [0.60; 1.87] | 0.05 | 1.23 [0.79; 1.90] | 0.20 | 1.08 [0.59; 1.98] | 0.08 | 1.13 [0.77; 1.65] | 0.12 |
| Context availability | 0.99 [0.59; 1.66] | 0.01 | 0.97 [0.66; 1.45] | -0.03 | 1.40 [0.81; 2.43] | 0.37 | 0.91 [0.63; 1.31] | -0.10 |
| Arousal | 1.00 [0.54; 1.84] | 0.003 | 1.37 [0.84; 2.22] | 0.32 | 1.15 [0.61; 2.19] | 0.14 | 1.27 [0.82; 1.95] | 0.24 |
| Valence | 0.78 [0.40; 1.52] | -0.25 | 2.17** [1.26; 3.73] | 0.78 | 1.24 [0.61; 2.52] | 0.21 | 1.37 [0.87; 2.17] | 0.31 |
| SER | 1.51 [0.94; 2.42] | 0.41 | 1.15 [0.79; 1.67] | 0.14 | 1.70* [0.01; 2.86] | 0.53 | 1.44* [1.04; 2.01] | 0.37 |
| BOI | 1.37 [0.76; 2.45] | 0.31 | 1.42 [0.90; 2.22] | 0.35 | 1.58 [0.85; 2.94] | 0.45 | 1.61* [1.08; 2.40] | 0.48 |
| VVIQ | 0.96 [0.64; 1.46] | -0.04 | 1.08 [0.76; 1.53] | 0.08 | 0.87 [0.55; 1.38] | -0.13 | 0.81 [0.50; 1.29] | -0.22 |

Notes. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$. VVIQ = Vividness of Visual Imagery Questionnaire.

Discussion

The present study was designed to test the role of situational processing in memory. To this end, we assessed the efficacy of four types of processing: MR, VI, MI, and SMI. Participants were instructed to process a set of 20 words in one of these four ways (incidental learning task). We collected free recall and recognition performances, to test the hypothesis that mental imagery involving a situated aspect is more effective than mental imagery without a situated aspect.

Free Recall

The most important finding was certainly that the SMI instruction produced more correctly recalled words than the MI and VI instructions. The fact that SMI was the most efficient in terms of recall performance corroborated our hypothesis about the situated nature of memory. In line with Barsalou et al. (2018) and Barsalou (2020), we concluded that memory supports situated action. A memory trace explicitly supporting a situated action is therefore more likely to be retrieved. As a primary function of the organism is to act in a particular situation, a memory trace based on a situated action should be favored over other traces, as it is more useful for the organism. In the SMI condition, each word was encoded with a specific, and situated goal-oriented action that prioritized this information in memory, making each memory trace more accessible at retrieval.

The three imagery instructions produced more correctly recalled words than MR, thus replicating results in the literature (Bower, 1972; Gupton & Frincke, 1970; Maraver et al., 2021; McCauley et al., 1996; Mueller & Jablonski, 1970; Oliver et al., 2016; Paivio, 1971; Pressley & Brewster, 1990), where imagery conditions have been found to produce more correct recalls than a control condition without imagery, the particularity of our study being that we tested three different types of imagery (the other studies tested either VI or a form of MI).

The absence of a difference between VI and MI ran counter to the assumptions of the embodied cognition framework, which states that MI should produce more correct recalls than VI (Marre et al., 2021). However, this result can be explained by a lack of distinctiveness between the memory traces created in MI, which reduced the potential benefits that MI might have had over VI. In VI, participants focused on the shape and color of the objects, which may have been more distinctive than grip type (power or precision) and throwing force in MI. At retrieval, it may have been easier to remember an object based on its shape and color (e.g., *round* and *yellow* may have been effective cues for recalling *lemon*, as these characteristics were not that common in the word list) than to recall an object based on grip and throwing force (e.g., a power grip and high throwing force may have been associated with a larger number of objects in the list). Thus, by focusing on purely motor elements (throwing force and grip type), participants in the MI group may have neglected useful visual cues. Significant differences between VI and MI in Marre et al. (2021) may have stemmed from the fact that MI instructions were oriented less precisely toward these motor elements (participants were just told to imagine throwing each object, without reporting grip type and throwing force).

Recognition

Every recognition measure (hits, false alarms and sensitivity) indicated that, compared to the MR group, SMI, MI and VI groups were better to distinguish between words that had actually been presented in the learning phase and the distractors. Better recognition

performance for participants in the mental imagery conditions can be interpreted as reflecting the use of a distinctiveness heuristic (Foley et al., 2006; Oliver et al., 2016) that made it easier to distinguish old words from new ones: if a detailed image was accessible to participants during the recognition test, they could deduce that it was because the image had been created during the encoding phase of the experiment. Regarding false recognitions, imagery preventing participants from falsely recognizing distractors has been observed in previous studies (Foley, 2012; Foley et al., 2006; Foley et al., 2009; Maraver et al., 2021; Robin & Mahé, 2015). However, no differences have been detected between the three types of imagery in terms of detection sensitivity, correct and false recognitions due to a ceiling effect (for correct recognitions) and a floor effect (for false recognition) reducing the differences between these conditions. Therefore, recognition tests do not appear to be appropriate tasks for revealing differences in memory performance between different types of mental imagery.

Influence of Word Characteristics on Recall

On the general sample level, the squared serial position effect indicated the presence of primacy and recency effects (i.e., the first and last words had a greater chance of being recalled than the middle ones). The positive linear relation of serial position indicated that the primacy effect was less strong than the recency effect. Moreover, even when we took these serial position effects into account, we found that the ease of physically interacting with a referent (body-object interaction ratings) predicted the odds of recalling it. The more the information was associated with motor components, the better the recall. In the same way, sensory experience ratings favored the chances of recalling the words, insofar as the more a word evoked a sensory experience, the more likely it was to be recalled. These patterns of results confirmed our hypothesis, and more broadly was in line with an embodied view of memory, as the more an item was associated with sensorimotor elements, the more available these elements were at retrieval, making the item easier to recall. Interestingly, this pattern appeared to vary across the four conditions.

The fact that only serial position and squared serial position were significant predictors in the MR group suggests that the processing of the words may have been rather shallow, compared with other groups, with not much processing of their referents. Retrieval in this group therefore relied on the words' peripheral characteristics (their position in the list), rather than on the characteristics of their referents. This also means that our task successfully directed the processing toward the shallow and phonological aspects of the words. By contrast, the fact that valence was a significant predictor in the VI group suggests that participants in this group did represent the words' referents during the task. SER being a significant predictor reflects the same referent representation, and more specifically, this shows that participants relied more on sensory information than in VI and MR. The fact that

body-object interaction scores and sensory experience ratings were significant predictors in the SMI condition highlights the specific aspects of this type of processing. It is additional evidence that participants imagined themselves as physically interacting with the objects, and that the memory benefits in this group were effectively due to the sensorimotor nature of this engaged process. The present study nevertheless had one main limitation, in that it used English body-object interaction norms, as no French ones were available at the time. Nevertheless, norms such as familiarity, object agreement, viewpoint agreement and manipulability collected from English native speakers have been found to be comparable to norms collected from French speakers (Brodeur et al., 2012). Thus, in all probability, body-object interaction norms are equivalent across these two languages.

Limitations

The efficacy of SMI confirmed the relevance of adding context to imagery for memory. However, there is a limitation concerning the motor aspects of this condition. The SMI condition, as constructed in our study, had a relatively high level of inter-items distinctiveness for imagined locations, making them good retrieval cues (e.g., if participants recall the garage location, it can help them recalling the image they formed for “hammer” in the study phase). On the contrary, SMI had a relatively low distinctiveness level for the motor component, because every object was associated with the same throwing action. This lack of distinctiveness in the motor component may have attenuated the benefits of SMI. We may therefore ask whether it is possible to modulate memory performance by increasing the distinctiveness of the motor component of SMI, or by decreasing the distinctiveness of the situated component. To this end, we considered the distinctiveness factor in a second experiment.

By enhancing the distinctiveness of the motor component of SMI, we can test if this motor element is used as a retrieval cue in the recall or recognition test. Increasing motor distinctiveness should improve performance compare to a mental imagery where actions are not as distinctive. This would also help confirm if the lack of difference between VI and MI was due to the motor component of MI providing not enough distinctive memory traces. On the other hand, lowering situational distinctiveness should decrease memory performances with SMI. To lower the level of distinctiveness of the location cue, we can instruct participants to imagine the same location for every object (e.g., if “garage” is the imagined location for all the items, it should cease to be used as a retrieval cue since it does not point towards a specific item). If the efficacy of this condition is specifically due to its situational dimension, making this element less distinctive should make it less useful to retrieval.

Varying the distinctiveness level to test the usefulness of an element as a retrieval cue has already been done in the isolation effect literature. According to this literature, “for a feature to be useful in a memory task, it has to allow differentiation of an item from the other

items in the list” (Guérard et al., 2014, pp. 2441.). By using an isolation paradigm, Guérard and colleagues found that a manipulable object was more easily memorized when presented in the context of unmanipulable items than in a context of items with same level of manipulability. Showing that an item is more recalled because its level of manipulability is a discriminant feature indicated that manipulability is a useful cue for memory.

Study 2

For this experiment, we created two new conditions : a situated motor imagery with distinctive actions but non distinctive locations (SM+I, *i.e.*, variation in the actions to execute with each object but always in the same location) and a situated motor imagery with a distinctive actions and locations (S+M+I, *i.e.*, variation in the actions and locations associated with each object). Recall performance from a situated motor imagery with non-distinctive actions but distinctive locations were already collected in the previous study in the SMI condition, which we will call S+MI in this experiment to take into account the distinctiveness factor.

We expected the recall performances to be better in S+M+I than in SM+I, meaning that the gain in situational distinctiveness translates into a gain in memory performance, which implies that the imagined context is used as a retrieval cue and therefore has a mnemonic utility. We expected the same pattern for when testing for the mnemonic utility of the imagined actions: performances are better in S+M+I than in S+MI, meaning that the gain in motor distinctiveness translates into a gain in memory performance and that the imagined actions are used for retrieval. We had no hypothesis concerning S+MI versus SM+I.

This design has the advantages of proving the importance of actions and situations as retrieval cues while maintaining a satisfactory level of elaboration between the conditions, SM+I, S+MI, and S+M+I being more comparable than SM+I and MI in Experiment 1. This experiment also specifies the optimal form that the elements of the situated motor imagery should take.

Method

Participants

We randomly assigned 111 (86 women and 25 men) participants to the two groups S+M+I ($n = 57$) and SM+I ($n = 54$). Individuals aged under 18 or over 50 years were excluded, as were individuals who did not speak French fluently or who had taken psychotropic substances (*i.e.*, drugs that could cause memory dysfunction, such as benzodiazepines).

Participants' mean age was 26.6 years ($SD = 10.4$, range = 18-50). Participants were recruited via social media groups (student and community groups). They all volunteered to take part in the research and gave their informed consent online. Those who were studying at the University of Toulouse Jean-Jaurès could earn credits for a methodology course.

Procedure

The procedure was the same as in experiment 1, the only difference being that there were two experimental groups. A first group was instructed to engage in situated motor imagery with distinctive actions but non-distinctive locations (SM+I) while the other was expected to do a situated motor imagery with distinctive actions and locations (S+M+I). Participants in the SM+I group were asked to imagine a situation where they demonstrated the use of each object to a friend *in only one place for all the presented objects*. They had to generate that place at the beginning of the experiment and type it. They were reminded this place at each trial. They then had to report the characteristics of the imagined situation (i.e., difficulty to demonstrate the utilization action and consistency of imagined location with each object). Participants in the S+M+I group were also asked to imagine a situation where they demonstrated the use of each object to a friend but *in a place that was coherent with each object*. They then had to report the characteristics of the imagined situation (i.e., difficulty to demonstrate the utilization action and imagined location).

To stay comparable to SM+I in Experiment 1, actions were imposed, locations were self-generated. For the same purpose, the actions in the two conditions implied a social interaction. The task of demonstrability rating was chosen for the participants to focus on distinctive characteristics of each action to be mentally performed.

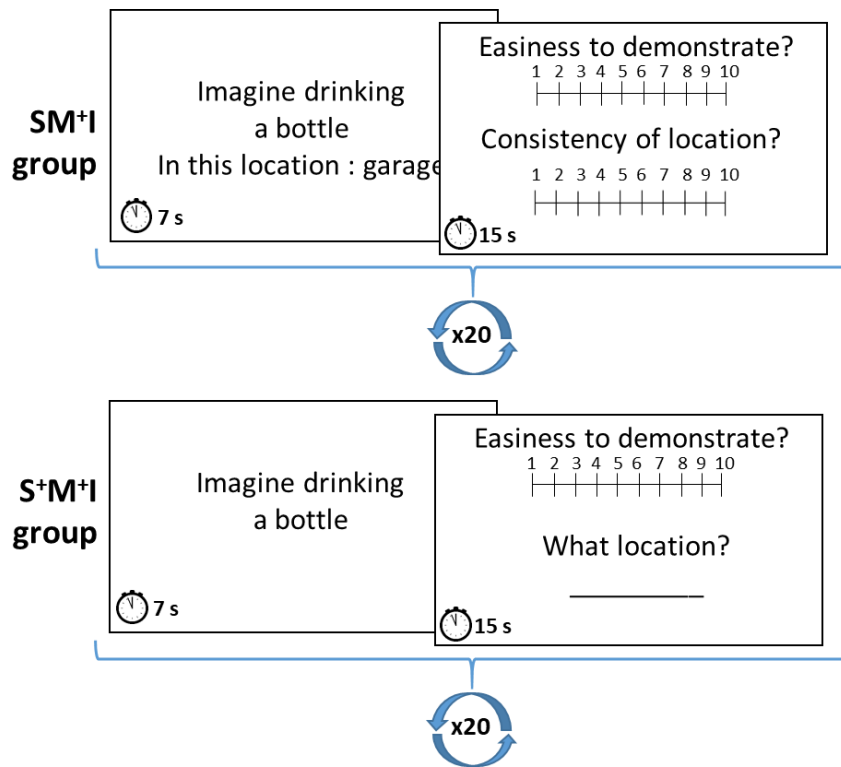


Figure 3. Schematic representation of the incidental learning task for each of the two groups. In the experimental phase, participants saw these two screens 20 times, as there were 20 words.

Material

Experiment 2 used the same material as Experiment 1 although there were specific actions that associated to each word. Stimuli used for this experiment can be found in Supplementary materials.

Results

Free recall

The overall recall performance in each group can be found in Table 4. To assess the statistical significance of this difference between S+M+I, SM+I and S+MI (tested in the first experiment), we built this binomial mixed model with the same method as in study 1: recall ~ instruction (1|participant) + (instruction|word). The comparison between S+M+I and SM+I indicated an absence of significant differences in the proportion of correct recalls ($OR = 1.09$ [.74; 1.61], $SE = .19$, $p = .604$). The same goes for the comparison between S+M+I and S+MI ($OR = .75$ [.49; 1.14], $SE = .14$, $p = .246$).

Table 4*Descriptive Statistics of Experiment 2 for Memory Performances as a Function of Encoding Instruction*

| | S+MI (SMI from exp 1) | SM+I | S+M+I |
|---------------------------------------|--|-------------|--------------|
| Proportion of correct recalls | .57 | .49 | .51 |
| Proportion of correct recognitions | .94 | .95 | .93 |
| Proportion of false recognitions | .03 | .04 | .05 |
| Median detection sensitivity (d') | 3.12 | 2.97 | 2.97 |

Note. S+MI = situated motor imagery with distinctive locations; SM+I = situated motor imagery with distinctive actions; S+M+I = situated motor imagery with distinctive locations and actions.

Recognition

For correct recognitions, this model was made: $\text{corr_reco} \sim \text{instruction} + \text{corr_reco.rt} + (1|\text{participant}) + (1|\text{word})$. S+M+I did not promote correct recognitions of old words compared with S+MI, $OR = .82$ [.37; 1.87], $SE = .30$, $p = .606$, or with SM+I, $OR = .63$ [.27; 1.49], $SE = .24$, $p = .460$. The same pattern can be observed for false recognitions. Indeed, S+M+I did not prevent participants from falsely recognizing new words when compared with S+MI, $OR = 1.94$ [0.79; 4.77], $SE = .078$, $p = .196$, or with SM+I, $OR = 1.47$ [.61; 3.56], $SE = .58$, $p = .325$. Moreover, no effect of instructions was found in the signal detection analysis, $\chi^2(2) = 1.94$, $p = .379$. The comparison between the d' sensitivity indices of S+M+I and SM+I ($p = .686$), as well as between S+M+I and S+MI ($p = .378$), did not yield any significant differences, indicating an equivalent ability to discriminate old words from new words among the three groups.

Discussion

Contrary to our hypothesis, S+M+I was no better than S+MI from the first study, both in terms of recall performance and recognition performance. Turning the imagined action into a more discriminant feature did not help memorizing. In the same manner, S+M+I was no more effective than SM+I; in other words, making the imagined situations more distinctive did not help participants to memorize the words. These results run counter to our expectations.

Making crucial imagery elements, such as actions and situations, more distinctive should have encouraged their use as retrieval cues and thus improved the memory performances. Yet, here, it seems that neither motor nor situational distinctiveness had an impact on recall and recognition performances. A plausible explanation may concern the difficulty of the task of this second experiment. For SM+I and S+M+I groups, participants had to produce demonstrability judgements for each word. Although, in theory, it appeared to be a good way to orient processing on the distinctive characteristics of each action and preserve the social interaction present in the situations of S+MI, this task may have been too hard to perform compared to the other conditions. These consisted in less complex tasks such as syllables counting, color, shape, grip or throwing power judgements. The demonstrability instruction may have been interpreted as a necessity to imagine oneself explaining the use of the object while using it, which can be hard to perform in 7 seconds. The inability to accurately imagine the scene described in the given instructions within the allotted time may have hindered the memorization of items within these groups. In any case, the protocol failed to inform us about the role of distinctiveness level and the relative memory utility of each component of the situated motor imagery. S+M+I did not represent the optimal strategy we expected, S+MI stays the optimal condition overall.

Conclusion

In a nutshell, the results of the present paper offer clues leading to a memory utility of situated processing involving a goal-oriented action. More broadly, this highlights the embodied and situated nature of memory processes and cognition. Moreover, depending on the type of processing carried out during the learning phase, the complementary analyses showed that the participants did not use the same retrieval cues during the free recall phase. Participants mostly used superficial cues (such as word position in the list) in the no imagery condition, and cues more related to the word referent in the other conditions. In particular, individuals who performed situated motor imagery during the learning phase remembered words mainly thanks to the sensorimotor characteristics of their referent. While it appears that the benefits of situated motor imagery primarily stem from sensorimotor aspects, the findings of our second experiment indicate that the precise level of distinctiveness necessary for optimal memory performance remains uncertain. Increasing the level of distinctiveness of the different imagery components (actions, situations or both) does not seem to change the memory efficacy of the strategies, although the way we manipulated distinctiveness may be the cause of this absence of effect. The investigation of the usefulness of sensorimotor elements for memory must be continued by designing tasks manipulating the situational and motor distinctiveness elements while maintaining an acceptable level of difficulty. Incidentally, a

situation cannot be reduced to a simple location. For that reason, we implemented a social aspect into the action to be performed in all three types of situated motor imagery. It would be valuable to explore the efficacy of situated motor imagery in the absence of this social component.

Declaration of Conflicting Interests

The author(s) declare no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- Albers, A. M., Kok, P., Toni, I., Dijkerman, H. C., & de Lange, F. P. (2013). Shared representations for working memory and mental imagery in early visual cortex. *Current Biology*, *23*(15), 1427–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.05.065>
- Barclay, J. R., Bransford, J. D., Franks, J. J., McCarrell, N. S., & Nitsch, K. (1974). Comprehension and semantic flexibility. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*(4), 471–481. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(74\)80024-1](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(74)80024-1)
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 577–660. <https://doi.org/10.1017/S0140525X99002149>
- Barsalou, L. W. (2007). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Barsalou, L. W. (2020). Challenges and opportunities for grounding cognition. *Journal of Cognition*, *3*(1). <https://doi.org/10.5334/joc.116>
- Barsalou, L. W., Dutriaux, L., & Scheepers, C. (2018). Moving beyond the distinction between concrete and abstract concepts. *Philosophical Transaction of the Royal Society B: Biological Sciences*, *373*(1752), 20170144. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0144>
- Barsalou, L. W., Simmons, W. K., Barbey, A. K., & Wilson, C. D. (2003). Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *TRENDS in Cognitive Science*, *7*(2), 84–91. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00029-3)

Barsalou, L.W., & Wiemer-Hastings, K. (2005) Situating abstract concepts. In D. Pecher & R. A. Zwaan (Eds.), *Grounding cognition: The role of perception and action in memory, language, and thinking* (pp. 129-163). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511499968.007>

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

Bonin, P., Méot, A., Aubert, L.-F., Malardier, N., Niedenthal, P. M., & Capelle-Toczek, M.-C. (2003). Concreteness, imageability, subjective frequency and emotionality ratings for 866 words. *L'Année Psychologique*, 103(4), 655–694. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29658>

Bonin, P., Méot, A., & Bugaiska, A. (2018). Concreteness norms for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and word recognition times. *Behavior Research Methods*, 50(6), 2366–2387. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1014-y>

Bonin, P., Méot, A., Ferrand, L., & Bugaiska, A. (2015). Sensory experience ratings (SERs) for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and visual word recognition. *Behavior Research Methods*, 47(3), 813–825. <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0503-x>

Bower, G. H. (1972). Mental imagery and associative learning. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory* (pp. 51–88). John Wiley & Sons.

Brodeur, M. B., Kehayia, E., Dion-Lessard, G., Chauret, M., Montreuil, T., Dionne-Dostie, E., & Lepage, M. (2012). The bank of standardized stimuli (BOSS): Comparison between French and English norms. *Behavior Research Methods*, 44(4), 961–970. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0184-7>

Brouillet, D., Brouillet, T., Milhau, A., Heurley, L., Vagnot, C., & Brunel, L. (2016). Word-to-picture recognition is a function of motor components mappings at the stage of retrieval. *International Journal of Psychology*, 51(5), 397–402. <https://doi.org/10.1002/ijop.12210>

Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M., & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory: Sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1081–1088. <https://doi.org/10.1037/a0015537>

Buckner, R. L., & Wheeler, M. E. (2001). The cognitive neuroscience of remembering. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 624–634. <https://doi.org/10.1038/35090048>

Cumming, J., & Williams, S. E. (2012). The role of imagery in performance. In S. M. Murphy (Ed.), *The Oxford handbook of sport and performance psychology* (pp. 213–232). Oxford University Press. <https://doi.org/10.13140/2.1.3274.5925>

Danker, J. F., & Anderson, J. R. (2010). The ghosts of brain states past: Remembering reactivates the brain regions engaged during encoding. *Psychological Bulletin*, 136(1), 87–102. <https://doi.org/10.1037/a0017937>

Dijkstra, N., Ambrogioni, L., Vidaurre, D., & van Gerven, M. (2020). Neural dynamics of perceptual inference and its reversal during imagery. *eLife*. <https://doi.org/10.7554/eLife.53588>

Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, 102(1), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009>

Downing-Doucet, F., & Guérard, K. (2014). A motor similarity effect in object memory. *Psychonomic Bulletin Review*, 21(4), 1033–1040. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0570-5>

Driskell, J. E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, 79(4), 481–492. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.79.4.481>

Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016). Learning is better with the hands free: The role of posture in the memory of manipulable objects. *PLOS ONE*, 11(7), e0159108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159108>

Engelkamp, J. (1995). Visual imagery and enactment of actions in memory. *British Journal of Psychology*, 86(2), 227–240. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1995.tb02558.x>

Engelkamp, J., Seiler, K. H., & Zimmer, H. D. (2004). Memory for actions: Item and relational information in categorized lists. *Psychological Research*, 69(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00426-003-0160-7>

Foley, M. A. (2012). Imagery encoding and false recognition errors: Exploring boundary conditions of imagery's enhancing effects. *Memory*, 20(7), 700–716. <https://doi.org/10.1080/09658211.2012.697172>

- Foley, M. A., Hughes, K., Librot, H., & Paysnick, A. (2009). Imagery encoding effects on memory in the DRM paradigm: A test of competing predictions. *Applied Cognitive Psychology, 23*(6), 828–848. <https://doi.org/10.1002/acp.1516>
- Foley, M. A., Wozniak, K. H., & Gillum, A. (2006). Imagination and false memory inductions: Investigating the role of process, content and source of imaginations. *Applied Cognitive Psychology, 20*(9), 1119–1141. <https://doi.org/10.1002/acp.1265>
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences, 4*(1), 23–48. <https://doi.org/10.1007/s11097-005-4737-z>
- Gatti, D., Vecchi, T., & Mazzoni, G. (2021). Cerebellum and semantic memory: A TMS study using the DRM paradigm. *Cortex, 135*, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.11.017>
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology, 66*(3), 325–331. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1975.tb01468.x>
- Guérard, K., Guerrette, M.-C., & Rowe, V. P. (2015). The role of motor affordances in immediate and long-term retention of objects. *Acta Psychologica, 162*, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.10.008>
- Guérard, K., & Lagacé, S. (2014). A motor isolation effect: When object manipulability modulates recall performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 67*(12), 2439–2454. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.932399>
- Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2009). Brain activity during visual versus kinaesthetic imagery: An fMRI study. *Human Brain Mapping, 30*, 2157–2172. <https://doi.org/10.1002/hbm.20658>
- Gupton, T., & Frincke, G. (1970). Imagery, mediational instructions, and noun position in free recall of noun-verb pairs. *Journal of Experimental Psychology, 86*(3), 461–462. <https://doi.org/10.1037/h0030178>
- Harris, C. R., & Pashler, H. (2005). Enhanced memory for negatively emotionally charged pictures without selective rumination. *Emotion, 5*(2), 191–199. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.5.2.191>
- Harrison, S. A., & Tong, F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. *Nature, 458*(7238), 632–635. <https://doi.org/10.1038/nature07832>

Hathout, N., Sajous, F., & Calderone, B. (2014). GLÀFF, a large versatile French lexicon. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'14)* (pp. 1007-1012).

Hesslow, G. (2012). The current status of the simulation theory of cognition. *Brain Research*, *1428*, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.026>

Iani, F. (2019). Embodied memories: Reviewing the role of the body in memory processes. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(6), 1747–1766. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01674-x>

Juhasz, B. J., & Yap, M. J. (2013). Sensory experience ratings for over 5,000 mono- and disyllabic words. *Behavior Research Methods*, *45*(1), 160–168. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0242-9>

Kensinger, E. A. (2009). Remembering the details: Effects of emotion. *Emotion Review*, *1*(2), 99–113. <https://doi.org/10.1177/1754073908100432>

Kinder, K. T., & Buss, A. T. (2021). The effect of motor engagement on memory: Testing a motor-induced encoding account. *Memory & Cognition*, *49*(3), 586–599. <https://doi.org/10.3758/s13421-020-01113-6>

Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*(1), 47–60. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.4.1.47>

Kosslyn, S. M., & Thompson, W. L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychological Bulletin*, *129*(5), 723–746. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.129.5.723>

Kumle, L., Vö, M. L., & Draschkow, D. (2021). Estimating power in (generalized) linear mixed models: an open introduction and tutorial in R. *Behavior Research Methods*, *53*(6), 2528–2543. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01546-0>

Lau, M. C., Goh, W. D., & Yap, M. J. (2018). An item-level analysis of lexical-semantic effects in free recall and recognition memory using the megastudy approach. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(10), 2207–2222. <https://doi.org/10.1177/1747021817739834>

Lenth, R. (2023). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R

package version 1.8.6, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

Levine, L. J., & Edelman, R. S. (2009). Emotion and memory narrowing: A review and goal-relevance approach. *Cognition and Emotion*, 23(5), 833–875. <https://doi.org/10.1080/02699930902738863>

Lorey, B., Bischoff, M., Pilgramm, S., Stark, R., Munzert, J., & Zentgraf, K. (2009). The embodied nature of motor imagery: The influence of posture and perspective. *Experimental Brain Research*, 194(2), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1693-1>

Macedonia, M., Lehner, A. E., & Repetto, C. (2020). Positive effects of grasping virtual objects on memory for novel words in a second language. *Science Reports*, 10(10760), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67539-9>

Makowski, D. (2018). The psycho Package: an Efficient and Publishing-Oriented Workflow for Psychological Science. *Journal of Open Source Software*, 3(22), 470. <https://doi.org/10.21105/joss.00470>

Maraver, M. J., Lapa, A., Garcia-Marques, L., Carneiro, P., & Raposo, A. (2021). Imagination reduces false memories for everyday action sentences: Evidence from pragmatic inferences. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.668899>

Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (2021). Embodied mental imagery improves memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 74(8), 1396–1405. <https://doi.org/10.1177/17470218211009227>

Mather, M., & Sutherland, M. (2009). Disentangling the effects of arousal and valence on memory for intrinsic details. *Emotion Review*, 1(2), 118–119. doi:10.1177/1754073908100435

McCauley, M. E., Eskes, G., & Moscovitch, M. (1996). The effect of imagery on explicit and implicit tests of memory in young and old people: A double dissociation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 50(1), 34–41. <https://doi.org/10.1037/1196-1961.50.1.34>

Mickley Steinmetz, K. R., Addis, D. R., & Kensinger, E. A. (2010). The effect of arousal on the emotional memory network depends on valence. *NeuroImage*, 53(1), 318–324. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.06.015

Mueller, J. H., & Jablonski, E. M. (1970). Instructions, noun imagery, and priority in free recall. *Psychological Reports*, 27(2), 559–566. <https://doi.org/10.2466/pro.1970.27.2.559>

Oliver, M. C., Bays, R. B., & Zabrocky, K. M. (2016). False memories and the DRM paradigm: Effect of imagery, list, and test type. *The Journal of General Psychology, 143*(1), 33–48. <https://doi.org/10.1080/00221309.2015.1110558>

Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. Holt, Rinehart and Winston.

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

Pexman, P. M., Muraki, E., Sidhu, D. M., Siakaluk, P. D., & Yap, M. J. (2019). Quantifying sensorimotor experience: Body–object interaction ratings for more than 9,000 English words. *Behavior Research Methods, 51*(2), 453–466. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1171-z>

Pezzulo, G., Barca, L., Bocconi, A. L., & Borghi, A. M. (2010). When affordances climb into your mind: Advantages of motor simulation in a memory task performed by novice and expert rock climbers. *Brain and Cognition, 73*(1), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.03.002>

Pressley, M., & Brewster, M. E. (1990). Imaginal elaboration of illustrations to facilitate fact learning: Creating memories of Prince Edward Island. *Applied Cognitive Psychology, 4*(5), 359–369. <https://doi.org/10.1002/acp.2350040502>

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Robin, F., & Mahé, A. (2015). Effects of image and verbal generation on false memory. *Imagination Cognition and Personality, 35*(1), 26–46. <https://doi.org/10.1177/0276236615574488>

Santarpia, A., Blanchet, A., Poinot, R., Lambert, J.-F., Mininni, G., & Thizon-Vidal, S. (2008). Evaluating the vividness of mental imagery in different French samples. *Pratiques Psychologiques, 14*(3), 421–441. <https://doi.org/10.1016/j.prps.2007.11.001>

Senkfor, A. J., Van Petten, C., & Kutas, M. (2002). Episodic action for real objects: An ERP investigation with perform, watch, and imagine action encoding tasks versus a non-action encoding task. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(3), 402–419. <https://doi.org/10.1162/089892902317361921>

- Serences, J. T., Ester, E. F., Vogel, E. K., & Awh, E. (2009). Stimulus-specific delay activity in human primary visual cortex. *Psychological Science*, *20*(2), 207–214. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02276.x>
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, *171*(3972), 701–703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Siakaluk, P. D., Pexman, P. M., Aguilera, L., Owen, W. J., & Sears, C. R. (2008). Evidence for the activation of sensorimotor information during visual word recognition: The body–object interaction effect. *Cognition*, *106*(1), 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.12.011>
- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 910–919. <https://doi.org/10.1162/089892901753165827>
- Sivashankar, Y., & Fernandes, M. A. (2021). Enhancing memory using enactment: Does meaning matter in action production? *Memory*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/09658211.2021.1995877>
- Smith, S. M. (1979). Remembering in and out of context. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *5*(5), 460–471. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.5.5.460>
- Smith, S. M., Glenberg, A., & Bjork, R. A. (1978). Environmental context and human memory. *Memory & Cognition*, *6*(4), 342–353. <https://doi.org/10.3758/BF03197465>
- Thomas, N. J. T. (2014). *Mental imagery*. <https://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery>
- Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-in: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, *26*(3), 280–306. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.892113>
- Yeh, W., & Barsalou, L. W. (2006). The situated nature of concepts. *American Journal of Psychology*, *119*(3), 349–384. <https://doi.org/10.2307/20445349>

CHAPITRE 3 : L'IMAGERIE MENTALE POUR MÉMORISER LES MOTS ABSTRAITS

Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (soumis). Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts.

Cet article a été soumis le 4 octobre 2023 pour révision dans le Journal of Memory and Language, édité par Elsevier.

S'il est assez aisé pour la plupart des individus de s'imaginer visuellement ce qu'est une chaise ou un éléphant, ce n'est pas le cas de concepts comme celui de deuil ou de liberté. Ces derniers sont plus abstraits que les premiers, ils ont moins de référents stables et identifiables dans le monde physique. La nature incarnée de la mémoire ainsi que les effets de l'imagerie mentale sur la mémoire sont systématiquement démontrés avec des stimuli (*e.g.*, mots, phrases, images) concrets. C'est notamment le cas de l'article précédent. Qu'en est-il des informations abstraites? L'imagerie mentale peut-elle aussi être une stratégie pour mémoriser des concepts abstraits? Cette dernière question en appelle une autre : Quelles expériences peuvent être simulées durant une telle imagerie mentale? Et par extension, dans quelles expériences les concepts abstraits peuvent-ils s'ancrer? Les concepts abstraits ont traditionnellement été considérés comme moins liés aux informations sensorimotrices, voire désincarnés et représentés de manière exclusivement linguistique (voir notamment la théorie du double codage de Allan Paivio, 1969).

Des axes de recherche relativement récents ont proposé différentes descriptions de la façon dont les concepts pourraient s'ancrer. Pour des auteurs comme Barsalou, le traitement du sens des mots repose sur la simulation de situations. L'information linguistique associée au mot n'est pas suffisante pour générer du sens (voire le problème de l'ancrage des symboles décrit dans la section 2.1 de la partie théorique, Harnad, 1990). La signification d'un mot nécessite un lien avec son référent, c'est-à-dire qu'il est nécessairement ancré dans des simulations de situations incluant les éléments sensoriels, moteurs, introspectifs et sociaux, même pour les concepts abstraits. La différence entre concepts concrets et abstraits étant que ces derniers sont représentés par des éléments situationnels plus internes (*i.e.*, plus introspectifs et émotionnels, ce qui est aussi supporté par Reggin et al., 2021; Kousta et al., 2011; Vigliocco et al., 2014; Villani et al., 2021) ou par un agrégat de situations (Barsalou et al., 2018).

Pour d'autres, le traitement du sens d'un mot, en particulier les mots abstraits, peut s'appuyer sur des informations linguistiques distributionnelles (*e.g.*, la fréquence d'apparition des mots ensemble, le contexte syntaxique), sans avoir besoin de déclencher une simulation située. Ici, l'une des principales différences avec les concepts concrets est que le traitement des concepts abstraits repose davantage sur ces informations linguistiques (*e.g.*, Borghi et al, 2017 ; Connell, 2019).

Dans cet article nous avons voulu défendre l'hypothèse qu'une imagerie mentale incarnée et située est possible pour optimiser la mémorisation de concepts abstraits. Nous avons ainsi comparé les performances de mémorisation de deux types de stratégies : l'une linguistique et l'autre impliquant de l'imagerie mentale située. Pour les deux expériences de l'article, nous avons tenu à prendre en compte les sous-catégories auxquelles appartenaient les concepts abstraits, les concepts abstraits n'étant pas une catégorie unifiée. De telles données n'existant pas dans la littérature pour des mots en français, nous avons fait une pré-étude de normes.

Recueil de normes

Le format dans lequel nous avons choisi de soumettre l'article n'a pas permis de présenter le recueil de normes comme une expérience à part entière. Il s'agit pourtant bien d'un recueil de données au même titre que les autres expériences de cette thèse. La place accordée à cette partie dans l'article n'est donc pas représentative du travail qui a été mis en œuvre.

Pour ce recueil de normes, nous avons isolé quatre sous-catégories (Conca et al., 2021 et Desai et al., 2018) :

- Les concepts abstraits émotionnels. Ces concepts sont liés à des expériences émotionnelles/affectives, à des sentiments qui peuvent être positifs ou négatifs et qui sont liés à la joie, à la peur, à la colère, etc. (*e.g.*, exaspération, inquiétude, gêne, affection, danger, satisfaction, admiration, cruauté).
- Les concepts sociaux. Ils se réfèrent à tout ce qui concerne les codes sociaux, la société, la culture et les situations où plusieurs individus interagissent (*e.g.*, amitié, politesse, accord, réputation, compétition).
- Les concepts d'états mentaux. Ces concepts concernent tout ce qui a trait à la "vie mentale" (à l'exclusion des émotions), c'est-à-dire les pensées, les idées, les opinions, les jugements, les opérations cognitives, l'activité mentale (*e.g.*, croyance, concentration, oubli, intention, mémoire, imagination).
- Les concepts liés à la magnitude. Ils font référence aux concepts qui décrivent les quantités, l'espace, le temps, les nombres et les concepts mathématiques (*e.g.*, addition, accumulation, lenteur, maximum, équation, angle).

Nous avons déterminé que ces catégories faisaient consensus dans la littérature à partir notamment des revues systématiques de Conca et al., 2021 et Desai et al., 2018. Par la suite, nous avons demandé en ligne à 88 personnes à quel point (de 0 à 100) chacun des 161 mots abstraits qui leur étaient présentés appartenait à ces quatre catégories. Pour des questions de faisabilité, nous avons pris les mots abstraits les plus émotionnels et sociaux comme stimuli dans l'expérience 1.

Expérience 1

Pour cette étude comparant stratégie linguistique et stratégie d'imagerie mentale située, chaque participant était aléatoirement assigné à une des deux stratégies, et devait retenir 6 listes de 10 mots abstraits en utilisant celle-ci. Les participants devaient soit :

- intégrer chaque mot dans une phrase inventée ou non, puis indiquer l'aisance à créer la phrase et à quel point ils étaient sûrs de l'avoir déjà entendue/prononcée
- imaginer une situation dans laquelle ils étaient impliqués (*e.g.*, s'imaginer s'amuser avec son meilleur ami pour illustrer le concept d'amitié) et qui illustrait chaque mot, puis indiquer la clarté de la scène et à quel point la situation était agréable/sociale

La moitié des mots était suivie d'une interférence visuelle (des carrés colorés changeant de position à une fréquence de 12Hz) censée perturber les processus visuels potentiellement engagés durant la création de phrase/image. Cette interférence avait pour but de contrôler que l'imagerie mentale était bien exécutée par les participants, et de savoir à quel point la création de phrase activait indirectement du contenu expérientiel.

Les résultats ont montré que l'utilisation de la stratégie d'imagerie située n'a pas augmenté les chances de rappeler un mot par rapport à la stratégie linguistique. Ceci laisse supposer qu'un traitement orienté vers les aspects linguistiques des concepts abstraits (*i.e.* le contexte linguistique d'occurrence des mots) est suffisant pour mémoriser des mots abstraits, et que l'activation explicite des expériences sensorimotrices n'est pas nécessaire. En revanche, cette conclusion ne peut pas revêtir un caractère définitif étant donné que nous n'avons pas réussi à déterminer à quel point la stratégie de phrase était purement linguistique. En effet, l'interférence n'a eu aucun effet délétère significatif sur la performance de rappel. C'est pour ces dernières raisons qu'une seconde expérience a été construite.

Expérience 2

Cette nouvelle expérience a été l'occasion d'implémenter une nouvelle interférence visuelle. Pour les essais avec interférence, les participants avaient à exécuter une tâche de mémoire de travail visuelle (*i.e.* retenir un ensemble de formes géométriques dénuées de sens) pendant l'utilisation de leur stratégie mnésique. Cette expérience a également été l'occasion

d'intégrer de nouvelles mesures de rappel : un rappel à la fin de l'expérience et un rappel différé 24 heures plus tard.

Cette seconde étude a montré un impact positif de l'imagerie mentale sur le moyen (entre ~ 3 min pour la dernière liste et 30 min pour la première) et le long terme (24 heures), mais pas sur le rappel à court terme (30 sec). L'écart entre les groupes de phrases semble se creuser au fil du temps jusqu'à ce que le type de stratégie devienne la variable qui explique le mieux les performances de rappel. Ceci fait de l'imagerie mentale une stratégie efficace si l'on tient compte de la stabilité de la trace mnésique à long terme. Les concepts abstraits étaient plus faciles à retrouver lorsque les processus de mémorisation étaient explicitement orientés vers leur contenu expérientiel que lorsqu'ils étaient orientés vers des caractéristiques plus linguistiques. Par conséquent, ces résultats soutiennent une vision incarnée où la récupération de la mémoire est la simulation d'expériences sensorimotrices et introspectives passées (Marre et al., 2021).

L'interférence visuelle a également incité le groupe "imagerie" à évaluer la situation imaginée comme moins claire, sans impact sur l'évaluation de la facilité dans le groupe "phrase". Cette diminution de la vivacité a indirectement incité les participants à l'imagerie à évaluer les mots plus lentement. En bref, l'interférence visuelle a davantage perturbé l'exécution de la tâche d'imagerie que celle de création de phrases. Cela suggère que la condition d'imagerie était en effet davantage basée sur des expériences visuelles que la condition de création de phrases. Cela nous permet de conclure que l'avantage observé de la stratégie d'imagerie sur le plan de la mémoire est bel et bien dû à son plus grand ancrage dans les expériences sensorielles (au moins visuelles).

Le matériel, les données brutes ainsi que le code R utilisé pour les analyses statistiques sont librement accessible sur OSF via ce lien : <https://osf.io/cvaf3/>

Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts

Abstract

Can you visualize a dog? Can you imagine grief? The latter may be more difficult, as *grief* has no easily identifiable physical referent in the external world compared to *dog*. These abstract concepts have been often considered to be represented in a linguistic and "disembodied" manner. On the contrary, other approaches postulate that abstract concepts can be grounded in situations involving perceptual, motor and introspective experiences. In two studies, we asked participants to memorize abstract words using either a linguistic strategy (making a sentence) or an imagery strategy (visually imagining a situation). The latter strategy optimized word recall over the medium (between 3 and 30 minutes) and the long term (after 24 hours). The memory representation of abstract concepts thus seems to be deeply rooted in experiences. Since linguistic information alone is a surface aspect, it appears insufficient for long-term memorization.

Keywords

Mental imagery, embodied cognition, free recall, mnemonics, psycholinguistics, interference

Introduction

Is a (mental) picture really worth a thousand words? When reading words such as "passion" or "dictatorship", it can be hard to think of a specific object in our physical environment. When it comes to concrete concepts, some theories have proposed that understanding concrete words such as "table" relies, at least in part, on the activation of a mental image of a table. It is more difficult to grasp how we understand more abstract words, or what constitutes their semantic content. While traditional models consider conceptual knowledge too abstract to be supported by anything other than amodal or linguistic symbol systems, some authors have proposed that concrete concepts at least are represented in a pictorial format. But even for these latter models, abstract concepts were thought to be represented mostly in a linguistic manner (e.g., Bower, 1970; Dove, 2014; Paivio, 1969), ungrounded, represented independently from sensory-motor modalities and being not, or only weakly, imageable. This lack of imageability has been considered to be the cause of

disadvantages when processing this kind of words, compared to concrete words which are processed faster (Binder et al., 2005; Bottini et al., 2022; Schwanenflugel & Stowe, 1989) and memorized better (Paivio, 1965; Paivio et al., 1968; Walker & Hulme, 1999), because they are represented via two codes, nonverbal images and verbal symbolic information (Paivio, 1969). Other, more recent hybrid models have adopted a similar distinction between modality-specific embodied mechanisms on the one hand and distributional linguistic information on the other, the latter type of information being better suited to representing abstract concepts (Andrews et al., 2014; Louwerse, 2018). Abstract concepts consequently pose some challenges for theories postulating that language comprehension and memory rely on the activation of sensorimotor experiences.

Embodied cognition in language and memory

The general assumption of the embodied cognition framework is that cognition, including high-level cognitive processes, is fundamentally anchored in the experiences emerging from our body apprehending and interacting with the outside world. Accordingly, language comprehension is expected to rely on multimodal mental simulations rather than on arbitrary and amodal symbols networks representing meaning (Barsalou, 2007; Gallese, 2005; Hesslow, 2012). This expectation has been supported with evidence on behavioral and neurophysiological levels. For instance, Horchak and Garrido (2022) asked participants to read and listen to sentences (describing sunlit or moonlit scenes) and then decide if the image (a sunlit or moonlit scene) presented later had been mentioned in the sentence. Pictures that were congruent with the previously heard or read sentence were responded to faster except when a visual interference was presented, indicating that sentence comprehension requires the simulation of the visual elements of referents. Language comprehension can also rely on the simulation of motor characteristics of the referents as evidenced by Onishi and colleagues (2022). They found that putting a constraint on participants' hands reduced brain activity in semantic networks and slowed down the semantic processing of the names of manipulable objects.

As for language comprehension, embodied cognition assumes that memory retrieval (in episodic and semantic memory) is based on mental simulations, i.e., the reenactment of perceptual, motor and introspective states of the encoding experience, which leads to reactivation of the same modality-specific regions involved in the original encoding (Guérard et al., 2015; Pezzulo et al., 2010; Versace et al., 2014). Several phenomena support this assumption (see Iani, 2019 for a review) such as the observed reenactment of the original encoding eye movements during retrieval. Laeng and colleagues (2014) found that when asked to visually inspect an object on a screen and then to imagine it, participants tended to look at

the same places on the screen during imagery as during previous perception. The closer these eye movements were to the encoding, the better the image recall performances. Consistently, when these movements were inhibited, memory performance was impaired. Other phenomena coherent with the simulation theory were observed such as the fact that gestures enhance memory performance when executed at encoding (Engelkamp, 1991 and more generally the enactment effect literature). In addition, retrieval of autobiographical memories is faster when participants are in a position congruent with the position involved in the memories (e.g., lying down in a recliner for a dentist memory) and these memories were more likely to be recalled once again two weeks later (Dijkstra et al., 2007). Additional evidence is provided by neuroimaging studies such as that by Garagnani, Kirilina and Pulvermüller (2021). The authors made participants learn novel words through association with a familiar action or object and observed that simply hearing these novel words triggered activation of the words' specific conceptual category in the primary and secondary visual cortices. This reenactment at retrieval can go beyond the brain and activate limbs as evidenced by electromyography: gestures used to learn words are reenacted during retrieval of these words (Repetto et al., 2021), even for abstract words.

Another argument for the embodied nature of memory is the effect of mental imagery on memory performances. In word retention tasks, imagining the visual elements of the referent is a rather good memory strategy to increase the number of correct recalls (e.g., Bower, 1972; Gupton & Frincke, 1970; Maraver et al., 2021; McCauley et al., 1996; Mueller & Jablonski, 1970; Oliver et al., 2016; Paivio, 1971; Pressley & Brewster, 1990) and decrease the number of false memories (Foley, 2012; Foley et al., 2006; Foley et al., 2009; Robin & Mahé, 2015; Maraver et al., 2021). More embodied types of imagery involving the re-enactment not only of visual experiences but also of motor ones seem even more effective (Marre et al., 2021). This literature appears to lead to the conclusion that the more the memorization consciously favors sensorimotor mental elaboration about an object, the more available the sensorimotor cues are when retrieving, thus facilitating the retrieval of the memory trace.

This embodied aspect of memory and the memory effects of mental imagery are systematically demonstrated through studies using concrete concepts as stimuli. What about abstract concepts?

Embodied cognition and abstract concepts: the role of linguistic elements and embodied simulation in language comprehension

There is a debate on the relative weight of linguistic information (especially the frequency of co-occurrence, the frequency of how often words appear together, the verbal

associations derived from co-occurrence patterns and syntactic information) and embodied simulations in language comprehension (Barsalou et al., 2008 for LASS theory; Borghi et al., 2017 for WAT theory; Connell & Lynott, 2014; Louwerse, 2018; Liu et al., 2021).

For authors such as Barsalou and colleagues (2008), the processing of the words' meaning relies on the simulation of situations (situated simulation system). Linguistic information associated to the word is not sufficient to generate meaning (cf. the symbol grounding problem, Harnad, 1990, i.e., amodal symbols cannot represent meaning in a stand-alone manner, linguistic information has to be grounded in non-linguistic experiences to become meaningful). A word's meaning requires mapping to its referent, that is to say, situations (including sensory, motor, introspective and social elements), even for abstract concepts. According to this approach, the difference between abstract and concrete concepts is that abstract concepts are represented by more internal situational elements (more introspective and emotional elements, *e.g.*, Fingerhut & Prinz, 2018; Villani et al., 2021). For instance, some authors claim that factors such as emotional valence (Kousta et al., 2011; Vigliocco et al., 2014) and interoceptive strength play a important part in the learning of abstract words, as they predict their age of acquisition in children, *i.e.*, they facilitate their acquisition (Reggin et al., 2021). The specificity of abstract concepts could also be that they rely more on an integration of several situations (Barsalou et al., 2017; and to some extent also the Act-In model, where abstract/categorical knowledge is assumed to emerge from the activation of a relatively high number of memory traces, *i.e.*, inter-trace activation) or on more complex sensorimotor processes (Del Maschio et al., 2022). Additionally, Liu et al., 2021 found that the ease of simulating a referent predicts the speed of processing of metaphors in a deep processing task but that linguistic elements (*i.e.* linguistic distributional frequency) do not. However, these linguistic elements do predict speed of processing for more shallow tasks. Several attempts have been made to apply predictions from embodied cognition to the learning of abstract concepts, with mixed results (full-body interaction to learn abstract concepts, Maliverni & Pares, 2014; computational models of learning numerical concepts through motor-auditory-visual association in robots, Di Nuovo & Cangelosi, 2021; Ulrich et al., 2022).

Other authors, however, argue that the processing of a word's meaning relies on linguistic distributional information, without the need to trigger any situated simulation, this linguistic shortcut being faster and cheaper than simulation (Connell, 2019). Distributional semantic models are based on the idea that words with similar meanings tend to share a similar linguistic context. One word can replace the other one within the same sentence without drastically changing the overall meaning of the sentence (Lund & Burgess, 1996). For instance, the word "bed" can be replaced by "table" without any significant semantic changes

in the sentence “The child slept on the bed”. Thus, in these models, the word "elephant" is considered semantically closer to "tiger" than to "whale" (Louwerse, 2018). This linguistic information is considered to have more weight in the representation of abstract concepts, concrete concepts relying more on memory traces left by direct sensory experience (Borghini et al., 2017; Louwerse, 2018). Although the linguistic grounding of abstract concepts can be viewed as a grounding in articulatory processes (e.g., Borghini et al., 2017), language is most commonly seen as a system of arbitrary symbols, which could explain the apparently disembodied quality of abstract concepts (Dove, 2014; Dove, 2016, Louwerse, 2018). Methods for quantifying the semantic content of words can be found in traditional cognitivist studies from the first half of the twentieth century where factors such as association value (Glazer, 1928) or meaningfulness (mean number of verbal associations a word elicits in a 60-second period; Noble, 1952; Noble et al., 1957) were considered as important contributors to verbal learning. In line with the idea that linguistic information alone is sufficient to represent a word's meaning, some studies have focused on the syntactic context (e.g., the syntactic bootstrapping hypothesis, Gleitman, 1990; Koenig and Woodward, 2007): it is claimed that children would identify links between a word's meaning and its linguistic environment (e.g., when verbs referencing a transfer movement are used in a sentence, they are associated to three nouns, a mover, a destination and an object, Gleitman, 1990) and then use them to infer meaning of new words, based solely on syntactic cues, without the need to make an explicit link to their physical referent (e.g., if a new word is associated with three nouns, it most likely refer to transfer).

Hypothesis & Goal

Judging by the literature cited above, it appears that retrieval is a reenactment of sensorimotor experiences. Thus, these sensorimotor experiences need to be activated while encoding in order to be retrieved. This can explain why an encoding using rich motor imagery leads to better recall than simple visual imagery or mental rehearsal, because there is more sensorimotor information to be retrieved. It seems plausible to have the same expectation for remembering an experience linked to an abstract concept. The representation of an abstract (and concrete) concept is constructed with situational elements. This representation is composed of situational elements concerning the person's internal states and social experiences. It is when these elements are activated that the abstract concept is the most activated. Therefore, when the encoding is explicitly oriented towards these elements of an abstract concept, the concept is more easily retrievable because it is more activated. Hence, a memorization strategy based on explicit situated simulation such as mental imagery is expected to be more effective than other strategies, notably linguistic ones, which are more superficial.

In this article, we argue that mental imagery produces a better memory performance than a linguistic memory strategy because, for long-term memory, embodied simulations have a greater role in retrieval than linguistic elements. Therefore, if, on the contrary, we find that a linguistic memory strategy produces a better memory performance than mental imagery, it would mean that linguistic elements are more important than experiential elements for memory retrieval. In the case where there are no differences between the two strategies, linguistic elements could be seen as sufficient to memorize abstract words, with embodied simulations not providing enough benefits. This article is also a good opportunity to test the memory efficiency of mental imagery on abstract words, as it is usually tested on concrete words.

We designed an experiment consisting in memorizing six lists of ten abstract words. One half of our volunteers had to imagine a situation for each word (i.e., an imagery strategy) for seven seconds each time and respond to a free recall test and a recognition test at the end of each list. The other half had to mentally create a sentence for each word (i.e., a linguistic strategy).

Beyond comparing the memory performance in the two strategies, we wanted to ensure that our participants memorized the words as expected. We implemented verification tasks (after the seven seconds during which the participants had to use the instructed strategy) to verify their compliance with instructions and to orient the participants' mental processes towards the ones we wanted to test. For even greater control of the processes involved in the two conditions, we added visual interference during the learning of half of the items. We expected the visual interference to disrupt memory performances especially for participants using mental imagery. We also expected this visual interference to slow down responses to the verification tasks, here again, mostly for the "imagery" group. In the same manner, it should have a more negative impact on the subjective reports of imagery vividness than on reported easiness of sentence making. These disruptions should reflect the expected visual nature of the processes involved in the "imagery" group whereas the "sentence" group should mainly use verbal rather than visual processes.

Data availability

The materials, data, analysis codes for Study 1 and 2 are accessible on OSF via this link: <https://osf.io/cvaf3/>.

Study 1

Methods

Participants

We randomly assigned 149 participants to the two groups corresponding to our four encoding conditions: sentence making ($n = 70$) and mental imagery ($n = 79$). We excluded individuals who did not speak French fluently or who had taken psychotropic substances (i.e., drugs that could cause memory dysfunction, such as benzodiazepines). Participants' mean age was 22.7 ($SD = 5.57$). Participants were recruited via social media groups (student and community groups). They all volunteered to take part in the research and gave their informed consent online. Those who were studying at the University of Toulouse Jean-Jaurès could earn credits for a methodology course. This research project was approved by the Research Ethics Committee of Toulouse University.

To calculate an a priori sample size, we used the method of Kumle and 2021 (Scenario 3)⁷. To compute the a priori sample size needed to detect the effect of the strategy variable on memory performance with a power of .80, we simulated a dataset using the estimates of Marre et al. (2021). Concerning the effect of interference and strategy*interference on memory performance, we used data from Dutriaux & Gyselinck (2017), these authors having tested the effect of a low-level interference (motor interference) on word memorization. Hence, to detect efficiently these effects on memory performance, the minimum number of participants required was 74. Similarly, to compute the a priori sample size needed to detect, with a power of .80, the effect of the variable interference and strategy*interference on response times, we simulated a dataset based on Ostarek & Huettig's (2017) estimates corresponding to the effect of a visual interference (of the same type as ours) on conceptual processing time. The minimum number of participants required was 148. We found no article specifically on the impact of sensorimotor interference on responses with Likert scales. It seemed plausible to expect an effect at least as great as the effects of our variables on response times.

⁷ Performing a power analysis on mixed models is more complex than other more traditional tests such as ANOVAs or t-tests. It requires finding detailed data previously published in the scientific literature. Since no study manipulates exactly the same variables as we do, we had to construct an artificial dataset, specifying, among other things, the expected coefficients of our fixed effects and the expected variance of our random effects. As this information is rarely specified in the body of the article, we needed to have access to the raw data from the studies or the R outputs from the statistical tests. To find out the sample size required for the effect of our variables on memory, the articles had to focus specifically on memory, and similarly for the effects on response times.

Procedure

An illustration of the procedure can be found in Fig. 1 and 2. The experiment was built with the Psychopy software (v2021.2.1, Peirce et al., 2019). The task was displayed on a computer monitor and the participants gave their response via a keyboard and a mouse. After having given their consent and having read the instructions, the participants had to memorize an initial list of 10 abstract words as practice. For each word, they had to use either (for 7 seconds):

- a "sentence" memory strategy which consisted in mentally integrating each word into a sentence⁸;
- a memory strategy based on situated mental imagery, consisting in imagining a situation in which they were involved (with social and affective elements) and that illustrated the concept.

Half of the participants were randomly assigned to the "sentence" group, the other half to the "situated imagery" group.

After each word, they were subjected to verification tasks (8 seconds) in order to check if they had carried out the strategy assigned to them. For the "sentence" group, they had to:

- rate on a scale of 1 (= no sentence found) to 5 (= very easy) how easy the sentence was to construct (for every word)
- indicate to what extent they thought they had already heard the sentence in their life (for half of the words)
- indicate to what extent they thought they had already said the sentence in their life (for the other half of the words)

These last two tasks were designed to direct participants' processing towards statistical information concerning exposure to the perceived and produced linguistic context.

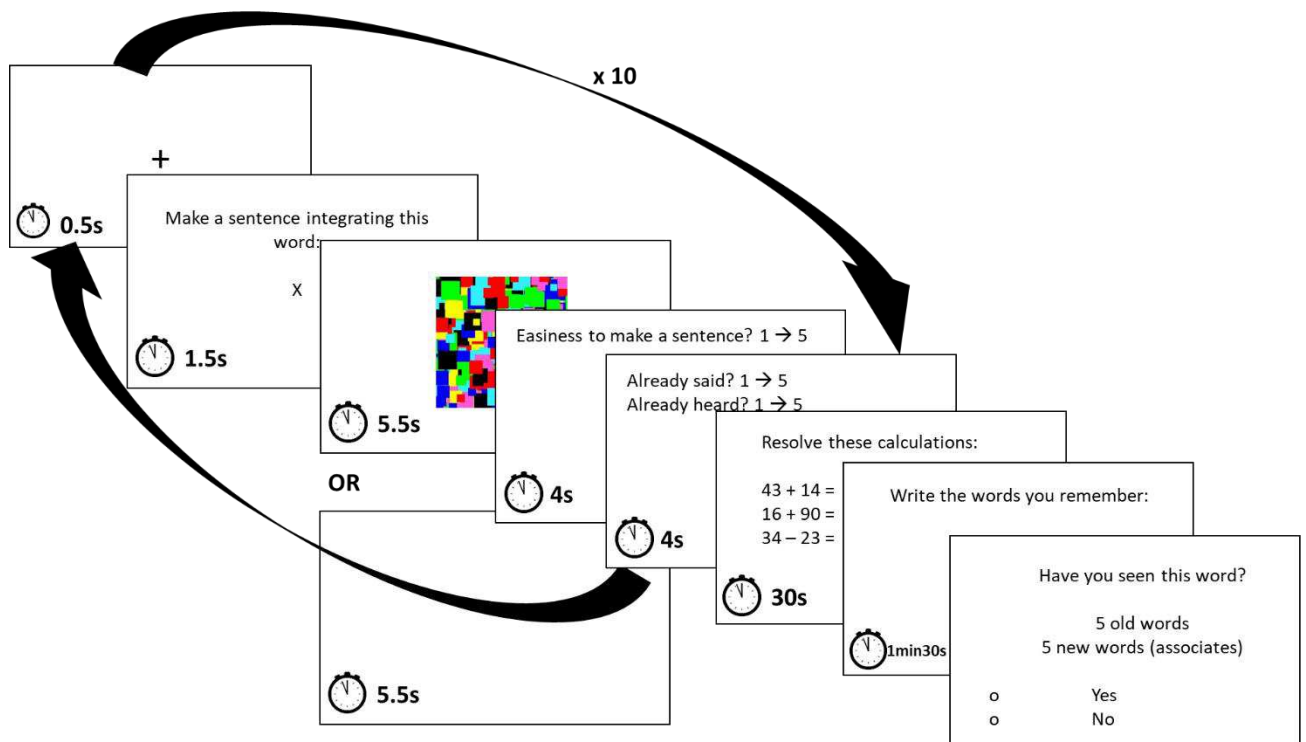
For the imagery group, they had to:

- rate on a scale of 1 (= no image found) to 5 (= very clear) how vivid the image was (for every word)
- indicate to what extent (1 to 5) their image involved social interaction (for half of the words)
- indicate to what extent (1 to 5) their imagined situation felt pleasant (for the other half of the words)

⁸ We are aware that in such sentence processing, an embodied view would predict the activation of embodied simulations since each word is situated and it is likely that in such conditions there would be semantic processing. Nevertheless, we argue that this condition is much more oriented towards linguistic elements associated with each word. Moreover, to assess to what extent this sentence making indirectly activates (visual) experiential content, a visual interference was displayed for half the words (cf. the end of the procedure part). Also, we chose a control task with a rather deep level of processing to have quasi-equivalent depth of processing between the two conditions.

These tasks were meant to encourage participants to inspect social, introspective and situational elements which are particularly important in the representation of abstract concepts in general (Conca et al., 2021) and especially in the words we used as stimuli. At the end of this 10-word sequence and as a distraction task, eight mathematical operations were displayed for 30 seconds, with the instruction to perform as many as possible. After that, they had to recall the words in 1min30 by typing them and to recognize among a set of distractors (five old, five new), which ones had been previously presented to them (recognition test). This training phase was followed by an identical experimental phase, this time with not one sequence but six.

On half of the six sequences, visual interference was applied between the presentation of each word and the verification task. This distraction was necessary to ensure that participants engaged visual processes during situated imagery, and did not engage visual processes during the "sentence" strategy. There should be a disruption of memorization in the



first case but not in the second.

Figure 1. Simplified illustration of the procedure in the sentence condition in Experiment 1

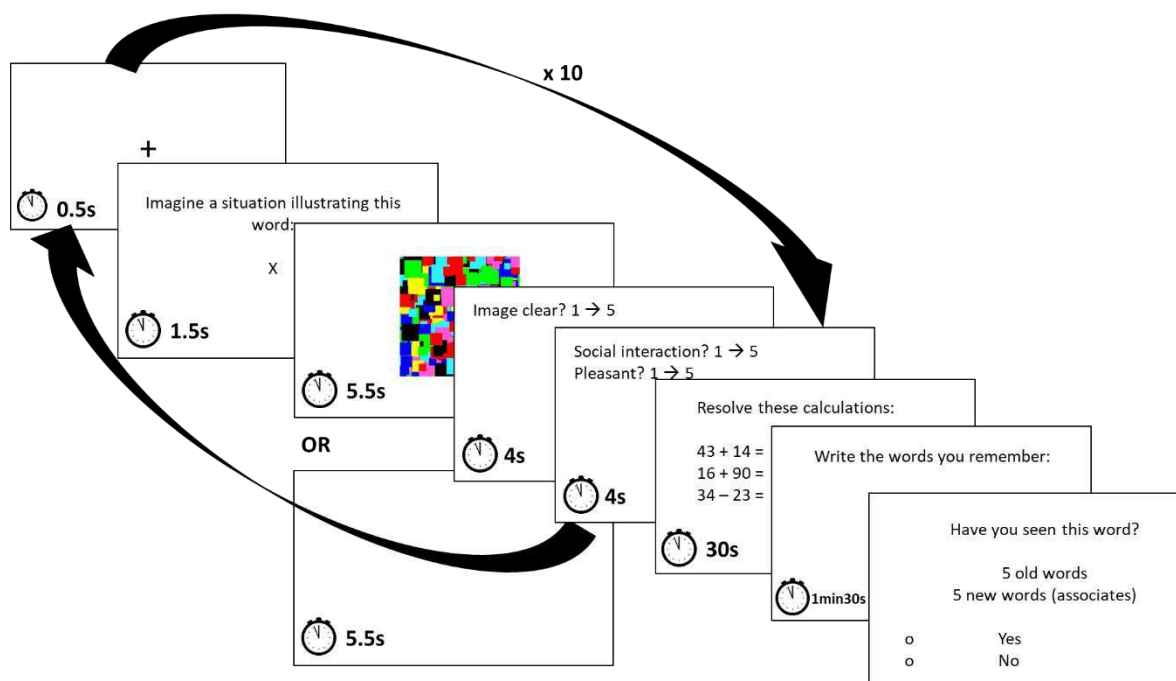


Figure 2. Simplified illustration of the procedure in the imagery condition in Experiment 1

Material

Determining categories for French abstract words. In fact, abstract concepts do not represent a unified category. Consequently, it would be fruitless to try to study abstract words without taking into account the type of topic they refer to and hope to generalize our conclusions to all abstract concepts. The scientific literature has recently tried to propose categorizations to solve this problem (Conca et al., 2021; Desai et al., 2018; Ghio et al., 2016; Harpaintner et al., 2018; Villani et al., 2019). However, a similar categorization has never been done for abstract French words. In view of the studies which propose categorizations and ways of apprehending the diversity of abstract concepts, we chose a top-down approach. In other words, we wanted to validate pre-existing categories rather than start from psycholinguistic data to observe the categories and patterns that emerge (bottom-up approach). As the review by Conca and colleagues was the most recent paper at the time of writing this article, it seemed to have the most perspective, so we used the subcategories of abstract concepts that they described (emotional, social, mental states and magnitude) to set up a norming study to find out to what extent individuals found these categories appropriate to the meaning they attribute to French abstract words. We recruited 245 participants in total (73 raters per word on average). We selected 161 French abstract words from Lakhzoum et al. 2021, who had collected concreteness scores for a number of abstract words that could be potential candidates for the following studies. We chose those with concreteness mean scores below 3.5. These 161 words were not presented to all participants. This set of words was divided into three lists, two of 54

words and one of 53 words. Each participant saw one of these three lists at random. A crucial advantage of the database of Lakhzoum and colleagues (2021) was that it provided pairs of semantically associated words, which was very useful for constructing a recognition test in order to have an alternative method of assessing memory performance. This norming study was conducted online. For each word, participants were given the opportunity to judge the degree (from 0 to 100) to which the word belonged to the categories "emotional", "social", "mental states" and "magnitude". They were also given the opportunity to indicate whether the words did not belong to any of the four categories, or whether they did not know the meaning of the word. The four categories were defined as follows:

- Emotional abstract concepts are linked to emotional/affective experiences, to feelings that can be either positive or negative and related to joy, fear, anger, etc. A concept can also fall into this category if it provokes these emotional experiences (e.g., exasperation, concern, embarrassment, affection, danger, satisfaction, admiration, cruelty)
- Social concepts refer to everything that involves social codes, society, culture and situations where several individuals interact with each other (e.g., friendship, politeness, agreement, reputation, competition)
- Mental states concepts concern everything to do with "mental life", (excluding emotions), i.e., thoughts, ideas, opinions, judgments, cognitive operations, mental activity (e.g., belief, concentration, forgetting, intention, memory, imagination)
- Magnitude concepts refer to concepts that describe quantities, space, time, numbers and mathematical concepts (e.g., addition, accumulation, slowness, maximum, equation, angle)

The data from this norming study are available on OSF (<https://osf.io/cvaf3/>). The words are provided in alphabetical order with their English translations along with their mean ratings and their standard deviations for concreteness, emotional aspects, social aspects, aspects linked to mental states, magnitude aspects, word length, orthographic neighborhood, old20, frequency, semantic associate and other lexical characteristics.

Words. To limit the variation of semantic content between words, we used only emotional and social abstract words based on the ratings of our norming study. We made sure to choose only words that were widely known by our norming participants (> 95%). While constituting the word lists, we did not control for other linguistic variables available in Lakhzoum et al. (2021) such as length and frequency because our word database for the norming study did not allow us to do so (not enough words from Lakhzoum's database were eligible for our norming study, thus controlling for these variables would have led to too small sets of stimuli for the following experiments). We preferred to control for semantic variables

(concreteness, emotional and social aspects) as they were expected to have the most influence on the participants' performance (especially in imagery tasks). Nevertheless, we took into account the other variables in our statistical models. These more lexical variables included word length (number of letters), the number of orthographic neighbors (*i.e.*, words that can be created by changing one letter without changing the position of the other letters), Old20 (*i.e.*, average Levenshtein distance of the 20 nearest neighbors, with the Levenshtein distance being the minimum number of characters to be deleted, inserted or replaced to move from the word to its neighbor) and frequency (computed from blog posts).

Visual interference. The visual interference consisted of Mondrian type squares randomly changing size, color and location at a frequency of 12Hz (one picture every 83ms). A frequency between 3 and 12Hz has been considered to be the most effective to disrupt the visual system (Tsuchiya & Koch, 2005) and was used successfully in a previous studies to disrupt low-level visual processes involved in conceptual processing (Edminston & Lupyan, 2017 ; Ostarek & Huettig, 2017).

Recognition test. Each recognition test was composed of five old words and five new words. New words were strongly associated with the five other words that were not in the test (based on their mean pair similarity from Lakhzoum et al., 2021). The purpose of a second memory measure was to observe potential memory effects that are not detectable through a free recall test and to obtain information on the relative sensitivity to distractors between the two strategy conditions (*i.e.*, to see whether a given condition activates the semantic neighborhood more than another).

Results

We analyzed the data of 149 participants (8860 observations) using R software (v.4.2.1; R Core Team, 2022) and the lme4 R package (v. 1.1-33, Bates et al., 2015). Mixed models were used because they are increasingly acknowledged as more powerful alternatives to traditional ANOVAs and t-tests as they allow to account for the hierarchical structure of our data, inter-group and intra-individual variability by specifying fixed and random effects (Brown, 2021; Yu et al., 2022). We built binomial mixed regression models to analyze free recall and recognition performance. Due to the distribution of reaction times that did not meet the normality assumption, several mixed models with different distribution families were tested: a linear gaussian mixed model, a generalized mixed inverse gaussian model and a gamma model. Only the gaussian and inverse gaussian converged but the linear gaussian mixed model exhibited significant residual issues and the inverse gaussian mixed model was theoretically

more aligned with reaction time data (Lo & Andrews, 2015), so we adopted the latter to analyze reaction times. For the analyses on the subjective ratings, we used gaussian linear mixed models, as it appeared to be a valid practice for the analysis of Likert-scale responses in general (Kizach, 2014).

Each model was built by gradually adding fixed and random effects within the limits of what our hypotheses allowed and avoiding keeping secondary variables that did not play a significant role. Effects of secondary variables such as age, gender or words' characteristics were tested individually and were included for control purposes if significant. There was no need to control for the effect of word characteristics when we are interested in the effect of strategy type, since the words in both strategy groups were the same. However, we did need to control for the potential effect of demographic variables (given that they vary between the two strategy groups) to avoid the risk of detecting a difference between the two strategies that is in fact due to a difference in age between the two groups for example. For the effect of interference, we needed to control for the effect of word characteristics, because for a given participant, we needed to know whether a word was not recalled because it was subject to interference, because it had a low frequency rating, etc. (even if randomization of word presentation order should limit a confounding effect of several variables). In any case, as we wanted to test the effect of strategy type and interference, we checked the effect of all these secondary variables. The reference level for the strategy variable was the sentence group, while for the interference variable it was the "non-interference" level. Detailed result tables can be found on the OSF.

Free Recall

To test the impact of memory strategy on the free recall performance, we built a binomial mixed model (using the `glmer` function) with this structure: `recall ~ strategy*interference + vividness&ease rating + position + position2 + emotional dimension + concreteness + log-frequency + word length + (1|participant) + (1|word)`. Results can be found in Table 1.

A marginally significant effect ($p = .056$) of strategy was found in favor of participants in the imagery group who recalled half of the words (.50) and the sentence group slightly less (.48), with the confidence interval of the odds ratio containing 1. There was no effect of interference, indicating no detrimental effect of learning with the visual dynamic noise (.49 versus .50 when no interference). The interaction between strategy and interference was not significant either, indicating no major differences in correct recall probabilities between the sentence-no interference group (.50), the sentence-interference group (.48), the imagery-no interference group (.50) and the imagery-interference group (.51).

Despite our efforts to control for serial position effects in the protocol, the word's (squared) position in the list remained the most important predictor of the recall performance (with a quadratic effect, *i.e.*, U-shaped relationship where the first and last words were better recalled than the words in the middle of the list) while controlling for other variables. Another important predictor was the vividness/ease of sentence-making ratings, which had a positive influence on recall. Words that were easy to integrate into a sentence or that led to clear imagery were more likely to be recalled. In general, inherent characteristics of words did not have an influence on their recall except for the concreteness associated with them, despite having controlled this variable in the material. More lexical variables such as old20, frequency and word length did not play a significant role.

Table 1*Binomial mixed effects regression results for the recall performance (Study 1)*

| <i>Predictors</i> | Recall | | | |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|------------------|
| | <i>Odds Ratios</i> | <i>Standardized estimates</i> | <i>SE</i> | <i>p</i> |
| (Intercept) | .79 [.69; .92] | -.23 | .06 | .002 |
| Interference* | .97 [.89; 1.07] | -.03 | .05 | .553 |
| Strategy** | 1.21 [1.00; 1.47] | .19 | .12 | .056 |
| Vividness and ease rating | 1.67 [1.50, 1.86] | .51 | .09 | < .001 |
| Serial position | 1.81 [1.65; 1.99] | .59 | .09 | < .001 |
| Serial position ² | 2.53 [2.53, 3.13] | .92 | .27 | < .001 |
| Emotional dimension | 1.23 [.99; 1.52] | .20 | .13 | .063 |
| Concreteness | .73 [.58; .91] | -.32 | .08 | .005 |
| Log-frequency | 1.20 [.95; 1.53] | .18 | .10 | .134 |
| Word length | .81 [.63; 1.04] | -.21 | .10 | .096 |
| Interference*Strategy | 1.03 [0.86; 1.24] | .03 | .10 | .783 |

Notes. 95% confidence intervals are in brackets. *Reference level = no interference. **Reference level = sentence making

Recognition accuracy

In order to test the impact of our variable of interest on the probability of correct recognition of previously presented words (hits), we built a binomial mixed model with this structure: hits ~ strategy*interference + vividness&ease rating + (1|participant) + (1|word). No significant effect of strategy was found, $OR = 1.19$ [.73; 1.93], $SE = .29$, $p = .492$, as participants in the imagery group did not produce a considerably higher proportion of hits (.95) compared to the sentence group (.94). For the visual interference, no effect was detected, either as a main effect, $OR = 1.11$ [.74; 1.68], $SE = .23$, $p = .605$, (.95 versus .94 when no interference) or in interaction with the strategy type, $OR = 1.16$ [.65; 2.08], $SE = .35$, $p = .618$ (the proportion of hits went from .94 without interference to .95 with the interference for the sentence group and from .95 to .96 for the imagery group). However, as with recall, the ratings on the verification task remained an important positive predictor of memory performance in the case of correct recognition of old words, $OR = 1.29$ [1.15; 1.44], $SE = .07$, $p < .001$.

We made an additional model for correct rejection of distractors: correct rejection ~ interference * strategy + age + (1|participant) + (1|word). No effect of strategy, $OR = .99$ [.67, 1.46], $SE = .20$, $p = .950$ (.90 for both groups), nor interference, $OR = .96$ [.71, 1.32], $SE = .15$, $p = .820$ (.89 without interference, .90 with interference), nor an interaction between the two, $OR = 1.19$ [.77, 1.83], $SE = .26$, $p = .438$ (the proportion of correct rejections went from .89

without interference to .90 with interference for the sentence group and .90 to .91 for the imagery group), was found on the odds of correct rejection, apart from an detrimental age effect, $OR = .95 [.93; .98]$, $SE = .01$, $p = .001$.

The effect of interference on the vividness and easiness ratings

Effect on reaction times. At the descriptive level, vividness ratings in the imagery group ($M = 1.63$, $SD = .80$, $Mdn = 1.52$, in seconds) took longer than easiness ratings in the sentence group ($M = 1.47$, $SD = .81$, $Mdn = 1.31$). Whatever the strategy group, words learned without interference took 1.54 seconds on average to rate ($SD = .8$, $Mdn = 1.41$), as for the words presented with an interference ($M = 1.54$, $SD = .81$, $Mdn = 1.40$). In the sentence group, it took 1.46 seconds on average ($SD = .80$, $Mdn = 1.31$) to rate words with no interference and 1.47 ($SD = .81$, $Mdn = 1.30$) for the words with the interference. In the imagery group, it took an average of 1.62 seconds ($SD = .79$, $Mdn = 1.53$) to rate the words without interference, and 1.64 ($SD = .81$, $Mdn = 1.51$) with interference.

We built an inverse gaussian mixed model with this R syntax: `vividness&ease rating RT ~ interference * strategy + position + (1|participant) + (1|word)`. Since the scale is inverted, the coefficients are to be interpreted in their opposite sign (a negative estimates indicates an increase in RT thus a slowing effect). The visual interference did not have any significant effect on RT neither globally, $\beta = -.005 [-.03, .02]$, $SE = .01$, $t = -.36$, $p = .723$, nor in interaction with the strategy type, $\beta = -.004 [-.04, .03]$, $SE = .02$, $t = -.24$, $p = .808$, while controlling for position and rating effects. Apart from strategy, the only variable with enough influence to be significant was the word's serial position, indicating that the first words were rated faster than the last words of the list, $\beta = .01 [.00, .01]$, $SE = .001$, $t = 4.57$, $p < .001$.

Effect on ratings. Participants responded to the verification task 95% of the time (8397 responses out of the 8860 collected responses for word recall). On average, participants rated the vividness of their images 3.69 out 5, and at least 4 for 50% of the time. In the sentence group, the mean ease of sentence making was 4.22 and 50% of the responses were rated 5 out of 5.

To analyze the effects of our predictors on these ratings, we built a linear mixed model: `vividness&ease ratings ~ interference*strategy + emotional dimension + log-frequency + age + (interference + emotional dimension + log-frequency|participant) + (strategy + interference + age|word)`. The interference did not have a significant effect, $\beta = .00 [-.06, -.07]$, $SE = .03$, $t = .15$, $p < .001$, nor did it interact with the strategy type ($\beta = -.21 [-.33, -.09]$, $SE = .06$, $t = -3.51$, $p < .001$). Therefore, the presence of an interference did not disturb participants on a subjective level even when looking into each strategy group. Interestingly, words were globally rated as more difficult to imagine than to integrate into a sentence, $\beta = -.51 [-.69, -.32]$, $SE =$

.09, $t = -5.39$, $p < .001$. In addition, the word's log-frequency in French language had a positive effect on ratings ($\beta = .30$ [.20, .40], $SE = .05$, $t = 5.75$, $p < .001$), that may indicate a familiarity effect where frequently used words are easier to imagine and to make a sentence with. We also found a negative effect of age on ratings, $\beta = -.24$ [-.42, -.06], $SE = .09$, $t = -2.61$, $p = .009$.

Discussion

No differences were found between the two strategies, in neither the free recall performance nor the recognition performance. Although the effect of strategy on recall was marginally significant, imagery does not appear to be considerably more effective than the verbal strategy for memorizing abstract concepts, with each strategy enabling participants to memorize around half of the 60 words.

Although our protocol included a 30-second buffer between the list and the recall test, the word's position had a large weight in the probability of recall (we controlled for this effect in our mixed models), which reflects the typical primacy and recency effect in memory experiments with word lists. The analysis of the effects of secondary variables revealed that the intrinsic characteristics of words did not play a major part in the recall performance, except for concreteness which had, surprisingly, a negative effect, whereas the literature usually finds a positive effect on memory performances (Paivio, 1965; Paivio et al., 1968; Walker & Hulme, 1999). However, since this effect was found on supposedly preselected abstract words (from 3.5 to 7 on the concreteness scale), this prevents us from assessing an effect that might take place on the entire concreteness scale (here, from 1 to 7). For lexical variables, the positive effect of frequency stands for the fact that frequent words are more easily remembered.

The absence of difference between the two strategy groups in the recognition performance can be attributed to a ceiling effect, the recognition task being too easy to detect any differences between the two groups. At least, mental imagery has proved possible for abstract concepts (cf. descriptive statistics for the vividness ratings in the results part), which were traditionally considered as being represented in a mostly verbal manner. This can be an argument for hybrid models (e.g., Dove, 2015; Kuhnke et al., 2023; Popham et al., 2021; Pulvermüller, 2013; Reilly et al., 2016): the linguistic and the experiential ways could be two possible paths to represent and retrieve abstract concepts (with linguistic elements being not necessarily amodal; they could be represented in an auditory or articulatory manner).

Concerning the visual interference, neither a main nor an interaction effect was detected on memory performance and reaction time. This is contrary to our hypotheses as we expected the visual interference to disturb free recall, recognition, to slow down reaction times to the verification tasks and to affect negatively the subjective ratings produced in these tasks. This absence of effect is surprising because mental imagery has been found to be based on

representations that share the same attributes as visual perception (Kosslyn, Ball & Reiser, 1978; Shepard & Metzler, 1971) and on brain systems involved in visual perception (Kosslyn & Thompson, 2003). There is a possibility that situated imagery of abstract concepts may not rely on low-level visual areas. This points to the need to replicate the experiment using higher-level interference. Furthermore, the dynamic visual noise we used works only when displayed for a short period. A longer exposure might have allowed the use of visual strategies to avoid this unpleasant stimulus. This experiment is not the first occurrence of an absence of visual interference effect using this procedure. Some authors have witnessed such a lack of effect of dynamic visual noise on imagery processes (*e.g.*, Avons & Sestieri, 2005; Castellà & Campoy, 2018). For these reasons, we decided to implement another procedure to interfere with these visual processes in the subsequent experiment as the absence of differential interference effects between the two groups prevents us from determining with certainty to what extent visual processes are involved in the recall of words in the imagery and the sentence condition.

We can nevertheless note that the participants made good use of the strategies as indicated. Looking at the standardized estimates, the verification task rating appears to be one of the main predictors of the recall performance, that is to say, recalling a word was determined by the ability to have used the strategies as instructed.

Study 2

As explained above, the goal of Experiment 2 was to interfere with the imagery processes using another procedure. It is important to detect whether imagery is more sensitive to visual interference than sentence making in order to control the visual/experiential nature of the imagery condition and the linguistic nature of the sentence condition. This is especially important given that sentence making required a relatively deep processing that could indirectly trigger sensory experiences. We chose to use a double task paradigm where the participants had to use either a sentence or an imagery strategy to memorize words, as in Experiment 1, but this time they also had to execute a visual working memory task in parallel.

Experiment 1 did not find any significant difference between imagery and sentence strategies on immediate recall performance. Such a difference could be found on more long-term memory tests. It was therefore decided to add another free recall test at the end of the experiment and a last one 24 hours later.

Finally, we took the opportunity to make our two conditions more comparable in terms of self-reference, to avoid the difference between the two conditions being attributable solely to a difference in self-reference level (see Procedure). Additional changes were made in the material, as detailed below in the Material part.

As already argued in Experiment 1, according to an embodied account, the imagery strategy should produce a better recall performance than the sentence strategy. Although this hypothesis was not corroborated in Experiment 1 through inferential statistics, descriptive statistics suggested a small advantage towards imagery. Moreover, in Experiment 1, there was only an immediate recall test. We expected that differences between the conditions would be more visible over time. Therefore, we planned to test the strategy effect once again.

An additional interaction effect between the memory strategy and the interference condition was expected (as in Study 1, once again). Visual interference decreases recall performance and slows down response time especially when participants use an imagery strategy to memorize. If the imagery group is more disturbed by this interference than the sentence group, it means that the superiority of the imagery strategy does indeed rely on its visual nature.

Methods

Participants

Seventy-five participants were randomly assigned to the two groups: sentence making ($n = 38$) and mental imagery ($n = 39$). Individuals who did not speak French fluently were

excluded, as were those who had taken psychotropic substances (i.e., drugs that could cause memory dysfunction, such as benzodiazepines). Participants' mean age was 22.5 (SD = 5.81). They were recruited via social media groups (student and community groups on Facebook) and on the campus of the University of Toulouse Jean Jaurès. They all volunteered to take part in the research and gave their informed consent online. Students in psychology could earn credits for a methodology course. This research project was approved by the Research Ethics Committee of Toulouse University.

Concerning the effect of the strategy variable, the interference variable and we did not change our expectations from Study 1, which required a sample size of 74 participants. As we expected the gap between our two strategies to increase over time, we considered that if this sample size was sufficient for immediate recall, it would be for the end recall and delayed recall. Regarding the effects of RTs, we did not find any article using a visual dual task paradigm such as ours with analyzes including mixed models (or making available their data), which made it impossible for us to compute an a priori sample size for the effects on RT using previous method. Most studies using a visual dual-task paradigm equivalent to ours had around 70 participants (e.g., between 15 and 18 participants for Fougny & Marois, 2009; 72 participants for Siegel et al., 2021, 70 for Postle et al., 2005). Therefore, our sample size of 77 participants should be sufficient to detect the expected effects with sufficient power. For the effects on ratings, we used the same heuristic as in the first experiment.

Procedure

The procedure was the same as in Study 1 except that no recognition tests were included because, according to Study 1, they do not seem to provide any additional information about the effect of conditions on memory performance. Also, as Study 2 was longer than the previous one, compromises had to be made for the experiment to remain attractive to volunteers. A final recall test was added at the end of the experiment and another recall test after 24 hours. To achieve a comparable level of self-reference as in the imagery condition, we modified the sentence-making instruction compared to Experiment 1: participants were told to mentally create a sentence in which each word could be integrated while using words such as “I”, “me”, “my” or “mine” (see Supplemental Material for the fully detailed instructions).

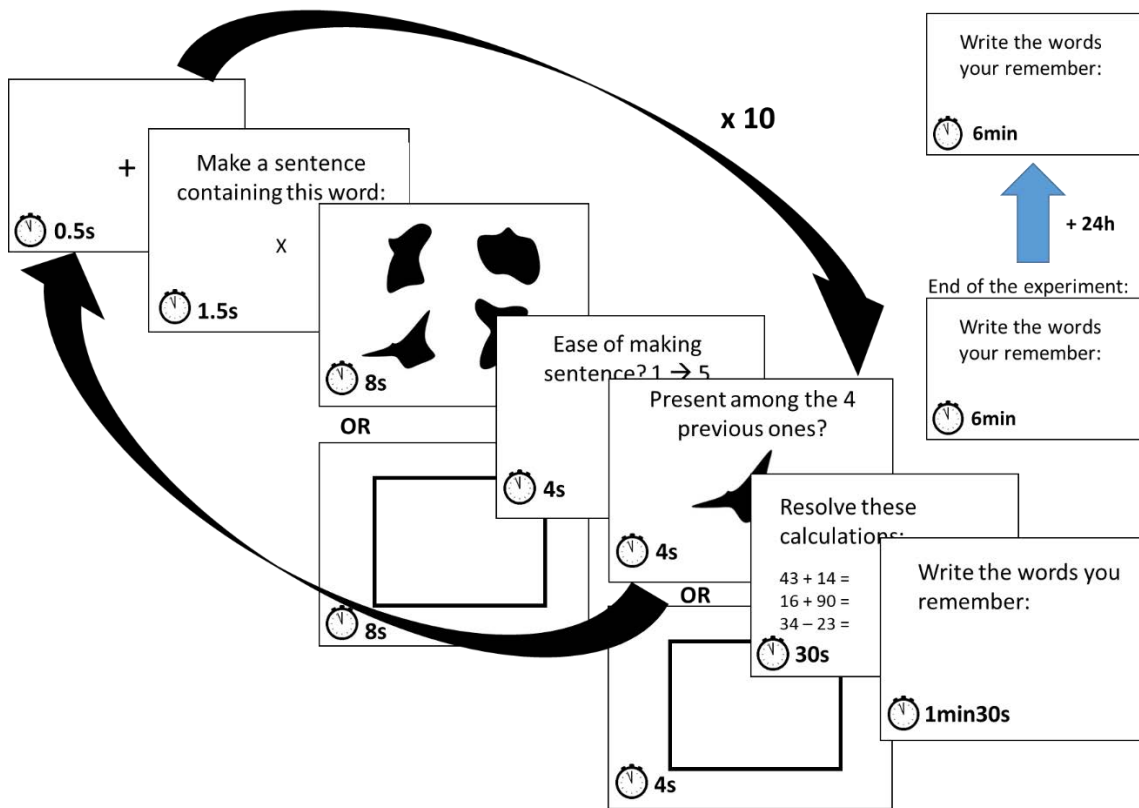


Figure 3. Simplified illustration of the procedure in the sentence condition in Study 2

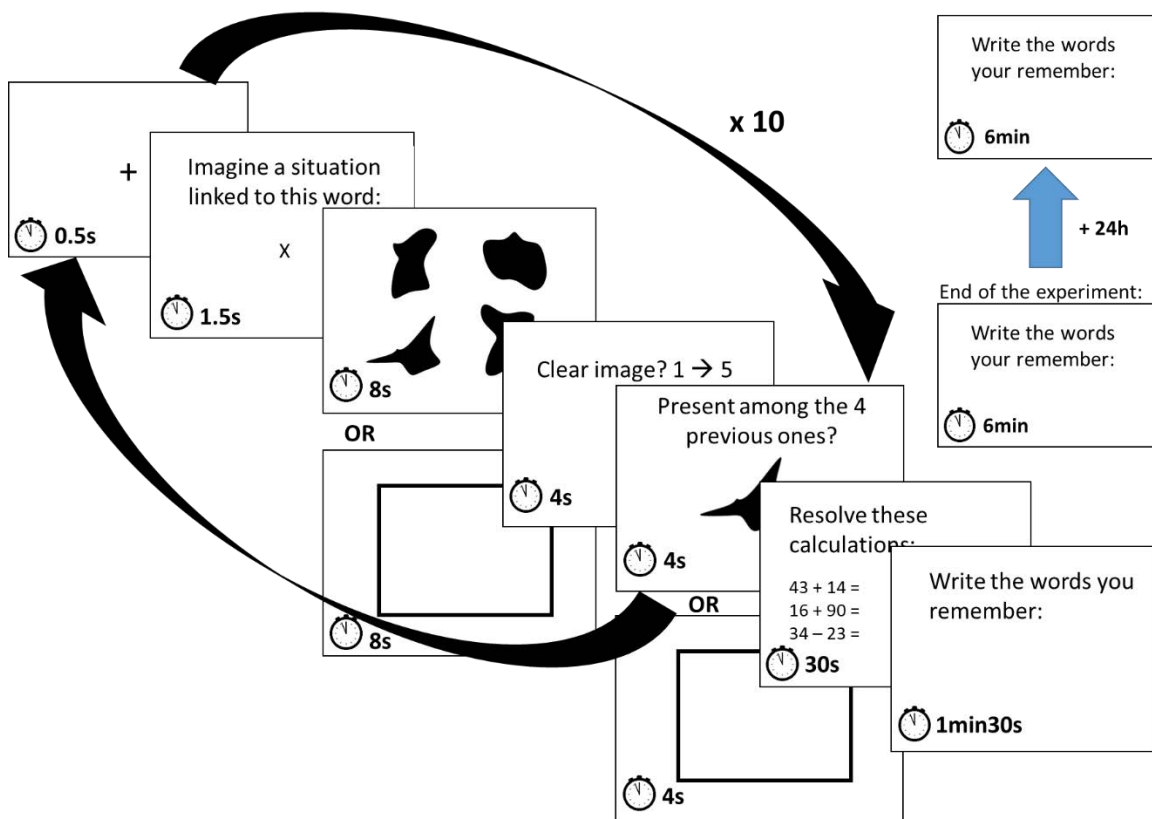


Figure 4. Simplified illustration of the procedure in the imagery condition in Study 2

This new interference consisted in a double-task paradigm where, for half of the words, participants had to memorize four shapes while using their attributed memory strategy during 8 seconds. After rating the ease of sentence-making/image vividness, another shape was presented and they had to indicate if the shape was present among the four previous ones. For the other half of the words, a rectangle was displayed to notify the absence of any interference to the participants.

Material

The stimuli for the double task paradigm were random meaningless black shapes as illustrated in Figure 3 and 4. These shapes were generated online via SVG shape generator (Softr, <https://www.softr.io/tools/svg-shape-generator>). Words in this experiment were chosen on the same criteria as in experiment 1. We additionally made sure that the words' meanings were not too close (*e.g.* anger-hatred, fear-fright) and we excluded difficult words that posed meaning problems for some participants in Experiment 1 (*e.g.*, fullness, altruism).

Results

The generalized mixed models were built with the same criteria as in Study 1. The reference level for the strategy variable is sentence making, for the interference variable it is the “non-interference” level.

Free recall

Immediate recall. The structure of the first model for immediate recall performance was: immediate recall ~ interference * strategy + verification task ratings + position + position² + log-frequency + word length + (1|participant) + (1|word). As in the first experiment, there was no significant effect of strategy on the odds of immediate recall (see Table 2). The visual interference significantly impaired the immediate recall performance in both groups (the proportion of recall was .59 without interference versus .53 with interference). No significant interaction between strategy and interference was found. With the word's squared position (indicating a primacy and recency effect), the verification task ratings were the strongest predictors of immediate recall. The easier it was to integrate words into a sentence or to vividly imagine them, the more probable subsequent recall was in the 30 seconds after the end of the list.

Table 2*Binomial mixed effects regression results for the immediate recall performance (Study 2)*

| <i>Predictors</i> | Immediate recall | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------|----------|
| | <i>Odds Ratios</i> | <i>Standardized estimates</i> | <i>SE</i> | <i>p</i> |
| (Intercept) | .98 [.82; 1.15] | -.03 | .08 | .768 |
| Interference* | .76 [.67; .86] | -.28 | .05 | < .001 |
| Strategy** | 1.20 [.95; 1.52] | .19 | .15 | .125 |
| Vividness and ease rating | 1.64 [1.42, 1.90] | .50 | .12 | < .001 |
| Serial position | 1.46 [1.28; 1.66] | .38 | .10 | < .001 |
| Serial position ² | 3.73 [2.78, 4.99] | 1.32 | .56 | < .001 |
| Concreteness | .84 [.66, 1.06] | -.18 | .10 | .145 |
| Log-frequency | 1.21 [.94; 1.55] | .19 | .15 | .140 |
| Word length | .91 [.71; 1.17] | -.09 | .12 | .461 |
| Interference*Strategy | 1.20 [.93; 1.55] | .18 | .16 | .164 |

Notes. 95% confidence intervals are in brackets. *Reference level = no interference. **Reference level = sentence making

Recall at the end of experiment. A second binomial mixed model was built for the recall performance at the end of the experiment: end recall ~ interference * strategy + vividness&ease rating + position + position² + concreteness + emotional dimension + word length + log-frequency + (1|participant) + (1|word). Results are available in Table 3. This time, as can be seen in Table 3, the strategy type had a significant effect on recall (the proportion of recall was .37 for the sentence group and .43 for the imagery group). The interference effect observed for immediate recall was maintained until the end of the experiment (.44 without interference versus .36 with interference), without much change in its magnitude. However, yet again, no interaction between strategy and interference was observed. The effect of the verification task rating also remained significant and even increased compared to immediate recall (*OR* = 1.64 for immediate recall versus *OR* = 1.70). The two serial position variables had a significant effect on recall odds. Position² still had a significant effect, which indicated that the primacy and recency effect remained, but, here, the first serial position variable had a negative influence (compared to a positive one for immediate recall odds). This change in sign is likely due to the attenuation of the recency effect at the end of the experiment. Another change from immediate recall performance is the deleterious effect of word length that was not visible until the end of the experiment.

Table 3*Binomial mixed effects regression results for the end recall performance (Study 2)*

| End recall | | | | |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| <i>Predictors</i> | <i>Odds Ratios</i> | <i>Standardized estimates</i> | <i>SE</i> | <i>p</i> |
| (Intercept) | .58 [.49; .69] | -.55 | .05 | < .001 |
| Interference* | .73 [.65; .83] | -.31 | .05 | < .001 |
| Strategy** | 1.42 [1.13; 1.78] | .35 | .17 | .003 |
| Vividness and ease rating | 1.70 [1.45, 1.98] | .53 | .13 | < .001 |
| Vividness and ease rating RT | .91 [.79, 1.07] | -.08 | .07 | .265 |
| Serial position | .88 [.78; 1.00] | -.13 | .06 | .046 |
| Serial position ² | 1.55 [1.16, 2.08] | .44 | .23 | .003 |
| Concreteness | .86 [.66; 1.12] | -.15 | .12 | .264 |
| Emotional dimension | 1.26 [.97; 1.64] | .23 | .17 | .088 |
| Word length | .71 [.54; .94] | -.34 | .10 | .018 |
| Log-frequency | 1.17 [.88; 1.56] | .16 | .17 | .273 |
| Interference * Strategy | 1.16 [.90; 1.50] | .15 | .15 | .264 |

Notes. 95% confidence intervals are in brackets. *Reference level = no interference. **Reference level = sentence making

Delayed recall (24 hours later). For the 24-hour recall performance, this model was built: delayed recall ~ interference * strategy + vividness&ease rating + position + concreteness + emotional dimension + word length + log-frequency + (1|participant) + (1|word). As can be seen in Table 4, a day after the experiment, the detrimental interference effect decreased slightly while remaining significant and leading to a correct recall proportion of .30 without interference and .26 with interference. The imagery group continued to outperform the sentence group (.31 in the imagery group versus .26 in the sentence group), with an even wider gap ($OR = 1.42$ for end recall versus $OR = 1.45$ for delayed recall), making strategy still one of the most weighted predictor in the model (observing standardized estimates). Even after 24 hours, no significant interaction effect between interference and strategy was observed. The effects of verification task rating, word length and serial position persisted in the same direction and with slightly less force when comparing the odds ratios, although the squared position was not included in the model because its effect on recall was not significant when tested individually. This marks the end of the recency effect after 24 hours. Despite our attempts to control the material, the effect of the word's emotional dimension appeared significant for this recall measure.

Table 4*Binomial mixed effects regression results for the delayed recall performance (Study 2)*

| <i>Predictors</i> | Delayed recall | | | |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------|---------------|
| | <i>Odds Ratios</i> | <i>Standardized estimates</i> | <i>SE</i> | <i>p</i> |
| (Intercept) | .34 [.27; .41] | -1.09 | .04 | < .001 |
| Interference* | .83 [.72; .96] | -.18 | .06 | .011 |
| Strategy** | 1.45 [1.05; 2.00] | .37 | .24 | .023 |
| Vividness and ease rating | 1.58 [1.33, 1.87] | .46 | .14 | < .001 |
| Serial position | .79 [.68; .91] | -.24 | .06 | .001 |
| Concreteness | .85 [.63; 1.16] | -.16 | .13 | .302 |
| Emotional dimension | 1.48 [1.10; 2.01] | .39 | .23 | .010 |
| Word length | .70 [.51; .96] | -.36 | .11 | .029 |
| Log-frequency | 1.23 [.89; 1.71] | .21 | .20 | .203 |
| Interference * Strategy | .99 [.74; 1.31] | .01 | .14 | .923 |

Notes. 95% confidence intervals are in brackets. *Reference level = no interference. **Reference level = sentence making

The effect of interference on the vividness and easiness ratings

Effect on reaction times. An inverse gaussian mixed model was made with this R syntax: `vividness&ease RT ~ interference * strategy + age + (1|participant) + (1|word)`. Bear in mind that since the scale is inverted, the coefficients are to be interpreted in their opposite sign (a negative β indicates an increase in RT thus a slowing effect). This model was built in the same way as the previous ones, thus the characteristics of the word did not play a significant role in explaining the variation in RT when tested individually. However, it was the case for age, which had a slowing effect on the responses to the verification task, $\beta = -.34$ [-.60, -.07], $SE = .13$, $t = -2.52$, $p = .012$. No main effect was detected for strategy ($\beta = -.19$ [-.45, .07], $SE = .13$, $t = -1.43$, $p = .152$). The interference had a significant slowing impact on RTs ($\beta = -.04$ [-.06, -.02], $SE = .01$, $t = -3.55$, $p < .001$) and did interact with the strategy type $\beta = -.05$ [-.09, -.01], $SE = .02$, $t = -2.40$, $p = .016$. The interference slowed down the rating's RT only for the imagery group ($M = 1.53$, $Mdn = 1.45$, $SD = .77$ without interference, $M = 1.68$, $Mdn = 1.60$, $SD = .68$ with interference) and not for the sentence group ($M = 1.53$, $Mdn = 1.43$, $SD = .78$ without interference, $M = 1.56$, $Mdn = 1.49$, $SD = .71$ with interference).

Effect on ratings. As for the first study, a large majority of participants responded to verification tasks (97% of the time). On average, participants rated the vividness of their

images 3.71 out 5, and at least 4 for 50% of the responses. In the sentence group, sentences were relatively easy to make as the participants rated 3.98 out 5 on average and 50% of the responses were at least 4 out of 5.

To analyze the effects of our predictors on these ratings, we built a linear mixed model (the significantly greater quality of fit compared to a random intercept model and the absence of convergence issues allowed us to fit a full random slope model this time) : $\text{vividness\&ease ratings} \sim \text{interference*strategy} + \text{log-frequency} + \text{emotional dimension} + \text{old20} + (\text{interference} + \text{log-frequency} + \text{emotional dimension} + \text{old20}|\text{participant}) + (\text{strategy} + \text{interference}|\text{word})$. The interference had significant negative effect ($\beta = -.16 [-.22, -.10]$, $SE = .03$, $t = -5.31$, $p < .001$) meaning that the presence of an interference made participants report imagery as less vivid and sentences as more difficult to make. This effect was different stronger in the imagery group than in the sentence group ($\beta = -.21 [-.33, -.09]$, $SE = .06$, $t = -3.51$, $p < .001$). The word's emotional dimension had positive effect on ratings ($\beta = .13 [-.04, .23]$, $SE = .05$, $t = 2.68$, $p = .007$), indicating a facilitating effect of imagery and sentence making on particularly emotional words.

General discussion

The most important finding may be the positive impact of mental imagery on medium (between ~ 3 min for the last list and 30 min for the first) and long-term (24 hours) recall but not on short-term recall (30 sec). The gap between the sentence group and the imagery group appeared to widen over time until strategy type became the variable that most explained recall performance, making mental imagery an effective strategy when taking into account the stability of the memory trace in the long term. This corroborates our expectations on the importance of experiences for the memory of abstract concepts. Abstract concepts were more available for retrieval when the memory processes were explicitly oriented towards their experiential content than when oriented towards more linguistic characteristics. The retrievability of these concepts declined slightly in the minutes and hours that followed, while in the sentence condition the decline was more marked. Consequently, these results support an embodied view where memory retrieval is the simulation of past sensorimotor and introspective experiences (Marre et al., 2021). This simulation is facilitated when participants use mental imagery, since, at the moment of recall, the concept-related experiences are activated more than in the sentence condition and are therefore more likely to be used as retrieval cues. For participants creating sentences, memorization is more oriented towards the concepts' surface linguistic features, such as the frequently associated linguistic context, that are less likely to be used for retrieval later on.

Both experiments demonstrated that imagery for abstract concepts is not only possible for most words, as the statistics on responses to the verification task show, but also, when properly implemented, enables effective retention of abstract words. Moreover, the analysis of the responses of the verification task indicated that participants did what they were told and the fact that the verification task ratings had a positive effect on recall showed that when participants managed to effectively follow the instructed strategies, it was beneficial for their memory performance.

We do not deny that sentence making can rely on experience, especially with instructions asking for self-reference. In fact, embodied cognition makes the same point: whenever semantic processing is involved, sensorimotor and emotional experiences are brought into play. The difference between the sentence condition and the imagery condition is in terms of the degree of embodiment. Sentence making is more oriented towards linguistic elements and less towards experiences compared to imagery. For the word "prestige", one can make the sentence "I'll have prestige if I succeed in my studies". With imagery instruction, one can imagine receiving a medal on a podium and being acclaimed by the audience. While the sentence can rely on experienced situations, it most likely relies on shallow memory traces of the linguistic (read or heard) context in which the word often appears, whereas the imagined scene probably relies more on visceral sensations and more deeply embodied experiences. Nor do we deny that linguistic information is useful for conceptual processing. As discussed in the literature review of this article, linguistic information seems to be important for a number of fairly superficial tasks (*e.g.*, lexical decision-making, sensitivity judgments).

Despite the control of emotional (and social) characteristics in the material, these emotional aspects (collected in the norming study) had a positive impact on recall, so we chose to keep it in the final regression models to control for its effect. This effect can be found in Study 2, after 24 hours. This may be a clue to the importance of emotions for the representation of abstract concepts in memory as argued by the affective embodiment account (Kousta et al., 2011; Vigliocco et al., 2014). This resonates with the facilitating effect of the word's emotional dimension on imagery and sentence making as reported by the participants. This can also reflect an arousal effect typically found in the literature on emotions and memory (Eysenck, 1976; Sharot & Phelps, 2004). Other word characteristics occasionally showed significant effects such as word length, indicating a more difficult memorization for long words in Study 2, and word frequency which indicated a clearer images and easier sentence making with frequent words in Study 1.

Contrary to Study 1, visual interference did have a negative impact on recall in Study 2. As expected, the words learned with the interference were less likely to be recalled. This effect tended to disappear over time. However, we also expected interference to have an interaction effect with the strategy type, with the negative influence of interference being

stronger for the imagery group than for the sentence group. While this expectation was not met for the recall performance in the second experiment, it was for our measures on the verification task. The visual interference made the imagery group rate their imagined situation as less vivid, with few impacts on the easiness ratings in the sentence group. This effect was mirrored in the reaction times: the interference slowed down responses to the verification task more in the imagery group than it did in the sentence group. In brief, the visual interference disrupted the execution of the imagery task more than the sentence making. This suggests that the imagery condition was indeed based more on visual experiences than the sentence condition. These are clues in favor of a larger grounding in sensory (or at least visual) experiences of the imagery strategy. Thus, given the observed memory advantage of the imagery strategy, it is likely that this greater experiential grounding is behind the gains in recall probability, as hypothesized.

Limitations

It is likely that sentence creation and mental imagery on abstract concepts bring out experiences other than visual ones, notably emotional/introspective ones. It is already fairly well accepted in the literature that abstract concepts are more rooted in introspective than visual or motor experiences. In both experiments, we considered that, in theory, mental imagery appeals more explicitly to personal sensorimotor experiences than sentence creation does, and therefore indirectly more to visual experiences which are themselves linked to emotional experiences. We therefore expected the visual interference to disrupt the proper execution of mental imagery and, by extension, the activation of introspective experiences. This mode of interference was chosen as introspective interference did not seem feasible, but an emotional interference might have been a more direct way to disrupt the grounding of abstract concepts and a more effective way to highlight the embodiment difference between the two conditions. In fact, although an interaction effect between strategy and interference was detected for our behavioral measures concerning the verification task, an interference disrupting more directly introspective experiences might have made it possible to detect such an effect on the recall performance.

Conclusion

After using two slightly different protocols, we found that mental imagery for abstract concepts is possible most of the time, contrary to what a disembodied view of abstract concept representation might support. Moreover, the benefits of this mental imagery only appear over the relatively long term. Optimal conditions for learning abstract concepts require activating their experiential content and facilitating their grounding, while verbal, "encyclopedic" processing does not create a sufficiently solid trace. Thus, the results of the memory effects of

imagery are transferable to abstract concepts. From the viewpoint of traditional theories such as Paivio's dual coding theory, this is evidence that abstract concepts can be represented in a pictorial manner, and that this "dual coding" is not exclusive to concrete concepts. It has to be kept in mind that participants were instructed to do a specific kind of mental imagining. They had to visually imagine a situation in which they were involved, which is not simply the creation of a visual image.

Furthermore, it is important to stress that, although the study demonstrates that, when it comes to memory, activating the experience of abstract concepts is more important than activating only the related linguistic information, this work does not demonstrate the uselessness of language in cognition. Linguistic networks and sensorimotor representation networks are interdependent (see Louwrese's Symbol Interdependence Hypothesis, 2018). The cognitive system encodes statistical regularities in the co-occurrence of linguistic information with sensorimotor information: a word used regularly in the same perceptual context will be automatically linked to it. On the contrary, if a word is never employed in a perceptual context, discerning its meaning becomes challenging and it is therefore likely that processing of the word will rely solely on its distributional linguistic network. Because of this statistical link between language and objects/events in the physical world, words can serve as cues that influence our predictive processes. The perception of linguistic information can prime the perception of the appropriate object. Words can serve as "pointers" to specific simulations and can guide our perception in noisy environments (Lupyan & Clark, 2015; Lupyan & Ward, 2013). While these linguistic symbols are pointers, they cannot stand on their own. They cannot "float" freely without being anchored in a non-linguistic representation, otherwise they would be amodal. Linguistic information is nothing without something to link it to; it is only an intermediary to sensorimotor information and cannot be anchored solely in a network of other linguistic symbols. The physical or linguistic context can constrain the meaning of the word, without which an embodied simulation could not be set up, rendering its meaning inaccessible (in a text, linguistic information can refer to a situation anaphorically or cataphorically to integrate respectively previous or upcoming information into an embodied situation simulation, Zwaan, 2016).

Acknowledgement

We would like to thank Dimitri Paisios for his help in R programming and Anna Borghi and the BALLAB for their theoretical and methodological advice which helped us to construct this paper.

Funding

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

References

- Andrews et al., 2014 Andrews, M., Frank, S., & Vigliocco, G. (2014). Reconciling Embodied and Distributional Accounts of Meaning in Language. *Topics in Cognitive Sciences*, 6(3), 359–370. <https://doi.org/10.1111/tops.12096>
- Barsalou, L. W., Santos, A., Simmons, W. K., & Wilson, C. D. (2008). Language and simulation in conceptual processing. *Symbols, embodiment, and meaning*, 245–283.
- Barsalou, L. W. (2007). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Binder, J. R., Westbury, C. F., McKiernan, K. A., Possing, E. T., & Medler, D. A. (2005). Distinct Brain Systems for Processing Concrete and Abstract Concepts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(6), 905–917. <https://doi.org/10.1162/0898929054021102>
- Borghi, A. M., Binkofski, F., Castelfranchi, C., Cimatti, F., Scorolli, C., & Tummolini, L. (2017). The challenge of abstract concepts. *Psychological Bulletin*, 143(3), 263–292. <https://doi.org/10.1037/bul0000089>
- Bottini, R., Morucci, P., D'Urso, A., Collignon, O., & Crepaldi, D. (2022). The concreteness advantage in lexical decision does not depend on perceptual simulations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(3), 731–738. <https://doi.org/10.1037/xge0001090>
- Bower, G. H. (1970). Analysis of a mnemonic device: Modern psychology uncovers the powerful components of an ancient system for improving memory. *American Scientist*, 58(5), 496–510. <https://www.jstor.org/stable/27829239>
- Bower, G. H. (1972). Mental imagery and associative learning. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory* (pp. 51–88). John Wiley & Sons

- Brown, V. A. (2021). An Introduction to Linear Mixed-Effects Modeling in R. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 4(1), 2515245920960351. <https://doi.org/10.1177/2515245920960351>
- Conca, F., Borsa, V. M., Cappa, S. F., & Catricalà, E. (2021). The multidimensionality of abstract concepts: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 127, 474–491. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.05.004>
- Connell, L., & Lynott, D. (2014). Principles of Representation: Why You Can't Represent the Same Concept Twice. *Topics in Cognitive Sciences*, 6(3), 390–406. <https://doi.org/10.1111/tops.12097>
- Del Maschio, N., Fedeli, D., Garofalo, G., & Buccino, G. (2021). Evidence for the Concreteness of Abstract Language: A Meta-Analysis of Neuroimaging Studies. *Brain Sciences*, 12(1), 32. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010032>
- Desai, R. H., Reilly, M., & van Dam, W. (2018). The multifaceted abstract brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373(1752), 20170122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0122>
- Di Nuovo, A., & Cangelosi, A. (2021). Abstract Concept Learning in Cognitive Robots. *Current Robotics Reports*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00038-x>
- Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, 102(1), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009>
- Dove, G. (2014). Thinking in words: Language as an embodied medium of thought. *Topics in Cognitive Sciences*, 6, 371–389. <https://doi.org/10.1111/tops.12102>
- Dove, G. (2016). Three symbol ungrounding problems: Abstract concepts and the future of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 1109–1121. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0825-4>
- Edmiston, P., & Lupyan, G. (2017). Visual interference disrupts visual knowledge. *Journal of Memory and Language*, 92, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2016.07.002>
- Engelkamp, J. (1995). Visual imagery and enactment of actions in memory. *British Journal of Psychology*, 86(2), 227–240. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1995.tb02558.x>

- Eysenck, M. W. (1976). Arousal, learning, and memory. *Psychological Bulletin*, 83(3), 389–404. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.83.3.389>
- Fingerhut, J., & Prinz, J. J. (2018). Grounding evaluative concepts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373(1752), 20170142. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0142>
- Foley, M. A. (2012). Imagery encoding and false recognition errors: Exploring boundary conditions of imagery's enhancing effects. *Memory*, 20(7), 700–716. <https://doi.org/10.1080/09658211.2012.697172>
- Foley, M. A., Wozniak, K. H., & Gillum, A. (2006). Imagination and false memory inductions: Investigating the role of process, content and source of imaginations. *Applied Cognitive Psychology*, 20(9), 1119–1141. <https://doi.org/10.1002/acp.1265>
- Foley, M. A., Hughes, K., Librot, H., & Paysnick, A. (2009). Imagery encoding effects on memory in the DRM paradigm: A test of competing predictions. *Applied Cognitive Psychology*, 23(6), 828–848. <https://doi.org/10.1002/acp.1516>
- Fougnie, D., & Marois, R. (2009). Dual-task interference in visual working memory: A limitation in storage capacity but not in encoding or retrieval. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(8), 1831–1841. <https://doi.org/10.3758/APP.71.8.1831>
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(1), 23–48. <https://doi.org/10.1007/s11097-005-4737-z>
- Garagnani, M., Kirilina, E., & Pulvermüller, F. (2021). Semantic Grounding of Novel Spoken Words in the Primary Visual Cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 581847. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.581847>
- Glaze, J. A. (1928). The association value of non-sense syllables. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 35, 255–269. <https://doi.org/10.1080/08856559.1928.10532156>
- Gleitman, L. (1990). The structural sources of verb meanings. *Language Acquisition*, 1, 3–55. https://doi.org/10.1207/s15327817la0101_2

- Ghio, M., Vaghi, M. M. S., Perani, D., & Tettamanti, M. (2016). Decoding the neural representation of fine-grained conceptual categories. *Neuroimage*, *132*, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.009>
- Gupton, T., & Frincke, G. (1970). Imagery, mediational instructions, and noun position in free recall of noun-verb pairs. *Journal of Experimental Psychology: General*, *86*(3), 461–462. <https://doi.org/10.1037/h0030178>
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D*, *42*(1), 335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
- Harpaintner, M., Trumpp, N. M., & Kiefer, M. (2018). The Semantic Content of Abstract Concepts: A Property Listing Study of 296 Abstract Words. *Frontiers in Psychology*, *9*, 412259. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01748>
- Hesslow, G. (2012). The current status of the simulation theory of cognition. *Brain Research*, *1428*, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.026>
- Horchak & Garrido (2022) Horchak, O. V., & Garrido, M. V. (2022). Simulating background settings during spoken and written sentence comprehension. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(4), 1426–1439. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02061-9>
- Kizach, J. (2014). Analyzing Likert-scale data with mixed-effects linear models: a simulation study. Poster Presented at Linguistic Evidence. <https://pure.au.dk/portal/files/70360382/simulationposterjk.pdf>
- Koenig, M. A., & Woodward, A. L. (2012). Word learning. In Oxford University Press eBooks (pp. 617-626). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198568971.013.0037>
- Kousta, S.-T., Vigliocco, G., Vinson, D. P., Andrews, M., & Del Campo, E. (2011). The representation of abstract words: Why emotion matters. *Journal of Experimental Psychology: General*, *140*(1), 14–34. <https://doi.org/10.1037/a0021446>
- Laeng, B., Bloem, I. M., D’Ascenzo, S., & Tommasi, L. (2014). Scrutinizing visual images: The role of gaze in mental imagery and memory. *Cognition*, *131*(2), 263–283. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.01.003>
- Lakhzoum, D., Izaute, M., & Ferrand, L. (2021). Semantic similarity and associated abstractness norms for 630 French word pairs. *Behavior Research Methods*, *53*(3), 1166–1178. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01488-z>

- Lo, S., & Andrews, S. (2015). To transform or not to transform: using generalized linear mixed models to analyse reaction time data. *Frontiers in Psychology*, 6, 148545. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01171>
- Louwerse, M. M. (2018). Knowing the Meaning of a Word by the Linguistic and Perceptual Company It Keeps. *Topics in Cognitive Sciences*, 10(3), 573–589. <https://doi.org/10.1111/tops.12349>
- Liu, P. Q., Connell, L., & Lynott, D. (2021). Can illness be bright? Metaphor comprehension depends on linguistic and embodied factors. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/qd4fa>
- Lund, K., & Burgess, C. (1996). Producing high-dimensional semantic spaces from lexical co-occurrence. *Behavior research methods, instruments, & computers*, 28(2), 203–208. <https://doi.org/10.3758/BF03204766>
- Lupyan, G & Clark, A. (2015). Words and the World: Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. *Current Directions in Psychological Science*, 24(4), 279–284. <https://doi.org/10.1177/0963721415570732>
- Lupyan, G., & Ward, E. J. (2013). Language can boost otherwise unseen objects into visual awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(35), 14196–14201. <https://doi.org/10.1073/pnas.1303312110>
- Malinverni, L., & Pares, N. (2014). Learning of Abstract Concepts through Full-Body Interaction: A Systematic Review. *Review Articles in Educational Technology*, 17(4). <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.100>
- Maraver, M. J., Lapa, A., Garcia-Marques, L., Carneiro, P., & Raposo, A. (2021). Imagination reduces false memories for everyday action sentences: Evidence from pragmatic inferences. *Frontiers in Psychology*, 12, 668899. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.668899>
- Marre, Q, Huet, N., & Labeye, E. (2021). Embodied mental imagery improves memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 74(8), 1396–1405. <https://doi.org/10.1177/17470218211009227>
- McCauley, M. E., Eskes, G., & Moscovitch, M. (1996). The effect of imagery on explicit and implicit tests of memory in young and old people: A double dissociation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 50(1), 34–41. <https://doi.org/10.1037/1196-1961.50.1.34>

- Mueller, J. H., & Jablonski, E. M. (1970). Instructions, noun imagery, and priority in free recall. *Psychological Reports*, 27(2), 559–566. <https://doi.org/10.2466/pro.1970.27.2.559>
- Noble, C. E. (1952). An analysis of meaning. *Psychological Review*, 59(6), 421–430. <https://doi.org/10.1037/h0054087>
- Noble, C. E., & McNeely, D. A. (1957). The role of meaningfulness (m) in paired-associate verbal learning. *Journal of Experimental Psychology*, 53(1), 16–22. <https://doi.org/10.1037/h0041215>
- Oliver, M. C., Bays, R. B., & Zabrucky, K. M. (2016). False memories and the DRM paradigm: Effect of imagery, list, and test type. *The Journal of General Psychology*, 143(1), 33–48. <https://doi.org/10.1080/00221309.2015.1110558>
- Onishi, S., Tobita, K., & Makioka, S. (2022). Hand constraint reduces brain activity and affects the speed of verbal responses on semantic tasks. *Scientific Reports*, 12(13545), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17702-1>
- Ostarek, M., & Huettig, F. (2017). A task-dependent causal role for low-level visual processes in spoken word comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(8), 1215–1224. <https://doi.org/10.1037/xlm0000375>
- Paivio, A. (1965). Abstractness, imagery, and meaningfulness in paired-associate learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4(1), 32–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(65\)80064-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(65)80064-0)
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, 76(3), 241–263. <https://doi.org/10.1037/h0027272>
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. Holt, Rinehart and Winston.
- Paivio, A., Rogers, T. B., & Smythe, P. C. (1968). Why are pictures easier to recall than words? *Psychonomic Science*, 11(4), 137–138. <https://doi.org/10.3758/BF03331011>
- Pressley, M., & Brewster, M. E. (1990). Imaginal elaboration of illustrations to facilitate fact learning: Creating memories of Prince Edward Island. *Applied Cognitive Psychology*, 4(5), 359–369. <https://doi.org/10.1002/acp.2350040502>
- Postle, B. R., D'Esposito, M., & Corkin, S. (2005). Effects of verbal and nonverbal interference on spatial and object visual working memory. *Memory & Cognition*, 33(2), 203–212. <https://doi.org/10.3758/BF03195309>

- Reggin, L. D., Muraki, E. J., & Pexman, P. M. (2021). Development of Abstract Word Knowledge. *Frontiers in Psychology*, *12*, 686478. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.686478>
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Repetto, C., Mathias, B., Weichselbaum, O., & Macedonia, M. (2021). Visual recognition of words learned with gestures induces motor resonance in the forearm muscles. *Scientific Reports*, *11*(17278), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96792-9>
- Robin, F., & Mahé, A. (2015). Effects of image and verbal generation on false memory. *Imagination Cognition and Personality*, *35*(1), 26–46. <https://doi.org/10.1177/0276236615574488>
- Schwanenflugel, P. J., & Stowe, R. W. (1989). Context availability and the processing of abstract and concrete words in sentences. *Reading Research Quarterly*, *24*(1), 114–126. <https://doi.org/10.2307/748013>
- Sharot, T., Phelps, E.A. How arousal modulates memory: Disentangling the effects of attention and retention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* *4*, 294–306 (2004). <https://doi.org/10.3758/CABN.4.3.294>
- Siegel, A. L. M., Schwartz, S. T., & Castel, A. D. (2021). Selective memory disrupted in intra-modal dual-task encoding conditions. *Memory & Cognition*, *49*(7), 1453–1472. <https://doi.org/10.3758/s13421-021-01166-1>
- Tsuchiya, N., & Koch, C. (2005). Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nature Neuroscience*, *8*, 1096–1101. <http://dx.doi.org/10.1038/nn1500>
- Ulrich, M., Harpaintner, M., Trumpp, N. M., Berger, A., & Kiefer, M. (2023). Academic training increases grounding of scientific concepts in experiential brain systems. *Cerebral Cortex*, *33*(9), 5646–5657. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac449>
- Vigliocco, G., Kousta, S.-T., Della Rosa, P. A., Vinson, D. P., Tettamanti, M., Devlin, J. T., & Cappa, S. F. (2014). The Neural Representation of Abstract Words: The Role of Emotion. *Cerebral Cortex*, *24*(7), 1767–1777. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht025>
- Villani, C., Lugli, L., Liuzza, M. T., & Borghi, A. M. (2019). Varieties of abstract concepts and their multiple dimensions. *Language and Cognition*, *11*(3), 403–430. <https://doi.org/10.1017/langcog.2019.23>

Villani, C., Lugli, L., Liuzza, M. T., Nicoletti, R., & Borghi, A. M. (2021). Sensorimotor and interoceptive dimensions in concrete and abstract concepts. *Journal of Memory and Language*, 116, 104173. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104173>

Walker, I., & Hulme, C. (1999). Concrete words are easier to recall than abstract words: Evidence for a semantic contribution to short-term serial recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(5), 1256–1271. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.25.5.1256>

Yu, Z., Guindani, M., Grieco, S. F., Chen, L., Holmes, T. C., & Xu, X. (2022). Beyond t-test and ANOVA: applications of mixed-effects models for more rigorous statistical analysis in neuroscience research. *Neuron*, 110(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.10.030>

Zwaan, R. A. (2016). Situation models, mental simulations, and abstract concepts in discourse comprehension. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 1028–1034. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0864-x>

CHAPITRE 4 : L'IMAGERIE MENTALE DANS L'APPRENTISSAGE À L'UNIVERSITÉ

Ce dernier chapitre présente un recueil de données résultant d'une application des précédents travaux à un contexte de classe. Un recueil supplémentaire est nécessaire pour adresser les limites de cette première étude et constituer un travail publiable. Cette étude fait suite à notre questionnement sur la mémoire des concepts abstraits. Elle représente une forte mise à l'épreuve de nos hypothèses sur l'utilité mnésique de l'imagerie mentale pour les concepts abstraits.

Résumé

La majorité de notre répertoire de concepts abstraits se constitue au sein des établissements scolaires. Cet apprentissage se fait en grande partie par le biais de la transmission orale et écrite, mais très peu à partir d'interactions sensori-motrices directes avec les référents réels des concepts qui font l'objet des apprentissages. Ce constat peut laisser supposer que les processus sensori-moteurs ont un rôle négligeable dans ce type d'apprentissage. Pourtant, selon le paradigme de la cognition incarnée, comprendre et se rappeler de concepts consiste en la reviviscence d'expériences sensori-motrices et introspectives. Sur la base du paradigme de la cognition incarnée, la présente expérience visait à montrer qu'une stratégie explicitement centrée sur ces aspects expérientiels (i.e., s'imaginer/visualiser/ressentir les aspects sensori-moteurs liés à l'objet d'apprentissage) facilite la mémorisation des concepts abstraits dans le contexte d'un apprentissage à l'université. Des consignes d'imagerie mentale au moment de l'apprentissage permettraient en effet d'amplifier les simulations naturellement mises en œuvre par l'apprenant en le guidant sur les aspects sensori-moteurs et introspectifs (émotionnels) à privilégier. Tout comme le fait le paradigme de la cognition incarnée pour l'ensemble des mécanismes cognitifs, ce travail avait pour but de réinterroger le rôle des systèmes sensori-moteurs et émotionnels dans ce contexte-là. Nous avons donc testé l'efficacité de l'imagerie mentale pour mémoriser des concepts abstraits liés au programme de psychologie cognitive à l'université. Cinquante-huit étudiant.e.s en troisième année de licence de psychologie ont été recruté.e.s. La première partie de l'expérience consistait en l'apprentissage en ligne de 10 concepts (*e.g.*, sentiment d'auto-efficacité, but de performance-évitement) ainsi que leur définition accompagnée d'un exemple. Contrairement à la première moitié des participants, la seconde moitié avait une instruction explicite d'imagerie mentale. Lors de la seconde partie de l'expérience, les participants étaient soumis à un test de mémoire « surprise » dans lequel ils étaient évalués sur leur capacité à se rappeler les noms des concepts, à les reconnaître parmi un ensemble d'intrus et à répondre à un QCM sur leur

définition. Aucune différence significative entre la condition contrôle et d'imagerie mentale n'a été trouvée, ce qui témoigne entre autre, de la difficulté à allier contrôle expérimental et contraintes écologiques.

Introduction

Les concepts abstraits selon la cognition incarnée

Les concepts abstraits se différencient des concepts plus concrets par leur mode d'acquisition, qui se fait de manière indirecte (Borghi et al., 2017). Si nous avons appris ce qu'était un arbre en voyant des images d'arbre ou en observant un tel objet dans notre environnement physique direct, ce n'est probablement pas le cas de concepts comme celui de "philosophie" ou de "psychologie cognitive". Ceci peut laisser penser que ces concepts, qui sont appris tardivement dans le développement et à l'école en général, sont représentés en mémoire de manière linguistique voire amodale, détachée des expériences sensorimotrices.

Pour la position incarnée les concepts abstraits restent tributaires des expériences sensori-motrices. Pour éviter les redondances avec le reste de la thèse, nous n'allons pas détailler le paradigme de la cognition incarnée. Les lecteurs pourront se référer à l'article précédent de cette thèse, *Imagining abstractness: the role of embodied simulations and language in memory for abstract concepts*. Néanmoins, nous pouvons résumer cette position en quelques mots. La plupart des chercheurs en psychologie incarnée travaillant sur le traitement des concepts abstraits soutiennent que ces derniers sont ancrés dans des situations/des scénarii mettant en jeu des éléments sensori-moteurs et introspectifs (émotions, sentiments, motivations, etc) et donc parfois des éléments très concrets. Comprendre et se rappeler d'un concept abstrait, c'est faire une simulation du contexte d'occurrence de celui-ci (avec un décor, des actions, des personnes, des éléments introspectifs qui lui sont généralement associés), comme le soutient notamment la théorie du cycle de l'action située de Barsalou (2020). La différence entre concepts concrets et abstraits étant que ces derniers sont représentés par des éléments situationnels plus internes, c'est-à-dire plus introspectifs et émotionnels, ce qui est aussi supporté par Barsalou et al., 2018 ; Kousta et al., 2011 ; Reggin et al., 2021 ; Vigliocco et al., 2014 ; Villani et al., 2021).

Des méthodes d'apprentissage incarnées

Si la mémoire et la compréhension du langage sont basées sur des simulations d'expériences sensorimotrices et introspectives, cela devrait se refléter dans des conditions écologiques d'apprentissage. En théorie, la cognition incarnée est capable de proposer des méthodes d'enseignement permettant de faire comprendre et apprendre des concepts aussi

abstraites que les concepts mathématiques. Glenberg (2022) illustre ceci avec le concept de régression vers la moyenne, en proposant de faire notamment référence à des situations concrètes de la vie quotidienne (e.g., utilisation d'outils de mesures simples) et d'utiliser des représentations graphiques. De la même manière, il serait possible d'apprendre des concepts de physique comme la force centrifuge en incarnant la formule $F = mv^2/r$. Glenberg (2011, p. 15) propose d'imaginer la situation suivante : “Imaginez que vous êtes sur des patins à roulettes dans un parking. Pour vous arrêter, vous saisissez un poteau et, en passant, vous commencez à tourner autour du poteau. Cette rotation est un mouvement circulaire et la force que vous ressentez dans vos bras est la force centripète, c'est-à-dire la force qui provoque le mouvement circulaire”. Chaque paramètre de la formule peut être ensuite relié à un aspect de cette expérience imaginée : la force F est la tension, la sensation que vous sentez dans le bras qui vous tire hors du poteau (et vous fait potentiellement mal) et augmente en fonction de votre masse m , de la vitesse v à laquelle vous êtes arrivés sur le poteau. La tension peut être réduite en augmentant, par exemple avec une corde, le rayon r du cercle que vous formez autour du poteau.

En 2004, l'équipe de Glenberg avait déjà proposé des pistes pour améliorer la compréhension écrite de concepts plus concrets chez les enfants à l'aide de manipulations physiques d'objets impliqués dans une histoire écrite, suivie par de l'imagerie mentale portant sur ces manipulations. Ce type d'intervention double les performances de rappel de texte par rapport au groupe contrôle et améliore également la qualité des réponses à des questions d'inférences sur le texte. L'amélioration des capacités de mémorisation de texte persiste plusieurs jours après l'intervention, sans instruction explicite à manipuler et imaginer les objets. En accord avec cela, l'apprentissage de nouveaux noms d'animaux en langue étrangère chez les enfants peut être facilité par le fait de faire des gestes en rapport avec chaque animal lorsque comparé à un apprentissage sédentaire (Schmidt et al., 2019). Ceci entre en résonance avec les résultats trouvés chez les adolescents (Mathias et al., 2022).

Les technologies de réalité virtuelle peuvent offrir plus de liberté dans le choix des objets d'apprentissage tout en permettant un environnement d'apprentissage plus contrôlé et en étant moins contraignantes que les procédures impliquant la manipulation d'objets réels. Certaines études ont donc testé l'influence de différents niveaux d'incarnation sur la mémoire. Plancher et al. (2013) ont montré qu'une interaction motrice (avec le volant) dans une tâche de conduite virtuelle, ou la planification active d'un itinéraire en temps réel, permet de mieux mémoriser les informations spatiales par rapport à une condition d'immersion plus basse (regarder passivement la vidéo d'une autre personne conduisant, sans planifier). Macedonia et al. (2020) ont également montré l'effet positif d'un apprentissage incarné en réalité virtuelle. Pour l'apprentissage de mots dans une nouvelle langue, avoir la possibilité de

prendre les objets auxquels les mots font référence améliore l'apprentissage par rapport à un apprentissage avec de la simple lecture et écoute de mots.

Concernant spécifiquement l'apprentissage de concepts abstraits, une revue de Malinverni et Pares (2014) a montré que des méthodes d'interaction corporelle (i.e., impliquant des mouvements et actions effectués dans le monde physique) implémentées dans cours de mathématiques, physique, langues ou encore de musique, que ce soit chez les adultes ou les enfants, pouvaient avoir des bénéfices. Notons néanmoins que sur les 15 articles ayant implémenté cette forme d'apprentissage interactif, neuf d'entre elles révèlent de meilleurs performances d'apprentissage, les bénéfices s'observant surtout par rapport aux méthodes d'enseignement traditionnelles et moins comparé aux apprentissages utilisant une interface sur ordinateur. De plus, une étude récente d'Ulrich et al. (2022) confirme cette idée selon laquelle les connaissances académiques abstraites ne sont pas assimilées de manière amodale mais préservent un ancrage sensorimoteur et émotionnel. Par le biais de l'IRMf, ces auteurs ont montré que la compréhension de concepts de psychologie scientifique chez des étudiants en psychologie, quel que soit leur niveau, reposait sur des circuits neuronaux impliqués dans l'action, la perception, les émotions et les interactions sociales.

L'imagerie mentale peut mettre à disposition un mode d'incarnation moins contraignant de par le fait qu'elle n'impose aucune contrainte matérielle. Comparée à d'autres stratégies de mémorisation comme le fait de parler à haute voix (effet de production, MacLeod et al., 2010 ; de génération, Slamecka & Graf, 1978) ou de faire des mouvements (*enactment effect*, *writing effect*, *drawing effect*, Wammes et al., 2016), l'imagerie mentale peut être implémentée dans tout type d'environnement d'apprentissage sans risque d'interférer avec les autres apprenants et chez tous types de personnes sans prérequis en termes de mobilité ou d'espace disponible.

L'impact positif d'une imagerie mentale incarnée sur la mémoire a déjà été démontré par les articles présents dans cette thèse ainsi que d'autres auteurs concernant des versions moins incarnées d'imagerie mentale (Bower, 1972 ; Gupton & Frincke, 1970 ; Maraver et al., 2021 ; Marre et al., 2021 ; McCauley et al., 1996 ; Mueller & Jablonski, 1970 ; Oliver et al., 2016 ; Paivio, 1971 ; Pressley & Brewster, 1990). Cependant, une limite de ces études concerne le fait que les stratégies proposées sont restreintes à l'apprentissage d'items discrets (Roediger, 1980), c'est-à-dire des listes de mots isolés. Les bases des stratégies mnémotechniques comme la méthode des lieux peuvent pourtant être efficacement adaptées à beaucoup d'autres situations plus écologiques. En 1974, Lorayne et Lucas ont par exemple proposé des moyens mnémotechniques à base d'imagerie mentale pour se souvenir des noms et visages de nouvelles personnes, des dates d'anniversaire, des dates historiques ou encore les noms d'artistes ainsi que leur courant artistique associé.

Ce rôle de l'imagerie mentale dans des situations écologiques a pu être mis en évidence plus récemment par Bates et collaborateurs (2021) qui ont fourni une preuve indirecte de l'utilité de l'imagerie mentale dans l'apprentissage des mathématiques. Après avoir été soumis à une série de tests d'habiletés d'imagerie (génération d'image, maintenance d'image, rotation mentale, balayage d'image mentale), 92 enfants de primaire ont répondu à des calculs à trous (e.g., $3 + ? = 4$). La performance à cette dernière tâche était positivement corrélée aux scores du test de rotation mentale (tout en contrôlant pour l'effet de l'âge) ce qui indiquerait un rôle important des habiletés de transformation de représentations mentales spatiales dans l'apprentissage des mathématiques. Ce domaine étant plutôt abstrait, nous pouvons nous interroger sur l'efficacité d'une telle imagerie mentale pour d'autres concepts abstraits rencontrés au cours de la scolarité de chacun.

Objectif et hypothèse

L'objectif de cette étude était de tester le rôle de l'imagerie mentale dans l'apprentissage de concepts abstraits, ici des concepts en lien avec la psychologie cognitive. Par extension, ce travail avait pour but de réinterroger le rôle des expériences sensori-motrices et émotionnelles dans un contexte universitaire où l'apprentissage se fait principalement par la transmission orale et écrite, laissant potentiellement penser un rôle négligeable de ces expériences. Un tel travail pourrait déboucher sur des recommandations en termes de mobilisation explicite d'expériences sensori-motrices et introspectives pour aider à la mémorisation des contenus de cours.

L'utilité de l'imagerie mentale pour mémoriser des concepts abstraits a déjà été démontrée dans l'article précédent. Nous voulions tester si cette utilité résistait au transfert en conditions plus écologiques. Au lieu de vérifier la mémorisation de simples mots avec des tests de rappel libre, la présente procédure consistait en l'apprentissage de concepts abstraits ainsi que de leur définition, suivi de diverses mesures de l'apprentissage ne se cantonnant pas au rappel libre (tests de reconnaissance et QCM). Comparé à une condition contrôle où il n'est pas demandé d'imaginer, nous prédisions qu'un apprentissage s'appuyant sur de l'imagerie mentale produirait une meilleure performance sur les différentes mesures d'apprentissage. Selon la cognition incarnée, nous comprenons et nous rappelons des concepts abstraits (comme ceux qui font l'objet d'apprentissages en psychologie à l'université) à l'aide des expériences sensori-motrices et introspectives qui les définissent. Notre hypothèse générale est que lors de l'apprentissage de concepts abstraits, des consignes d'imagerie mentale visant à amplifier les simulations naturellement mises en œuvre par l'apprenant, c'est-à-dire qui le guident vers les aspects sensori-moteurs et introspectifs à privilégier, faciliteront les apprentissages, comparé à un apprentissage sans consigne d'imagerie.

Méthode

Participants

La participation à cette étude était ouverte à tous les étudiants de troisième année de la Licence mention psychologie inscrits en régime contrôle continu à l'UE PY00503T Psychologie cognitive de l'université Toulouse Jean Jaurès. Notre échantillon était constitué de 96 participants dont 49 dans le groupe contrôle et 48 dans le groupe d'imagerie mentale. Le recrutement s'est déroulé sur IRIS (accessible via leur Environnement de Travail Numérique), en cours magistral et lors des travaux dirigés. Les étudiants inscrits en régime contrôle continu à l'UE00503T se sont vus proposer par leurs enseignants en cours magistral, travaux dirigés et sur IRIS, une activité facultative de révision (accessible depuis IRIS avec un lien redirigeant vers l'expérience sur Qualtrics) des concepts vus au dernier cours magistral (CM6 sur la motivation). Pour les étudiants souhaitant accéder à cette activité, il était nécessaire de répondre à une fiche de consentement qui précisait que la non-validation du consentement n'aurait aucune répercussion sur les interactions des étudiants avec les responsables de l'unité d'enseignement, leur chargé d'enseignement en travaux dirigés, ni sur les attendus et objectifs de l'unité d'enseignement.

Pour les participants, cette expérience revêtait plusieurs bénéfices pédagogiques. Un premier résidait dans l'outil de révision que leur offrait l'expérience sur des concepts qui venaient d'être vus en cours magistral (l'expérience a été adaptée au planning des séances afin de respecter la temporalité des enseignements). Etant donné que les étudiants ont régulièrement des activités à faire entre les séances de travaux dirigés, cette expérience constituait un renforcement de la méthode pédagogique déjà mise en place dans cette unité d'enseignement. Indépendamment de la condition dans laquelle les étudiants, les mises en situation concrètes et différentes de ce qu'ils avaient pu voir en cours permettaient d'avoir un potentiel bénéfique en termes de compréhension de ces concepts par rapport à l'enseignement de base. L'apport en connaissances métacognitives sur les stratégies d'imagerie mentale constituaient un deuxième bénéfice potentiel. Les résultats d'une telle expérience pouvaient renseigner les étudiants sur l'efficacité relative de cette stratégie de mémorisation pour leurs révisions. Les consignes d'imagerie se centrant sur les aspects émotionnels et introspectifs, l'expérience était également l'occasion d'illustrer concrètement l'importance des émotions dans les apprentissages (faisant alors écho à un des piliers de l'apprentissage présenté dans cette unité d'apprentissage).

Procédure

Il y avait deux phases à l'expérience :

La phase d'apprentissage

Le contenu de cette phase concernait des concepts vus au début de la semaine en cours magistral de psychologie cognitive. Dès la fin du cours magistral, les étudiants pouvaient accéder à leur Environnement Numérique de Travail (ENT) sur lequel leur était proposé un lien qui les redirigeait vers l'expérience sur Qualtrics. Cette activité était disponible en ligne les deux premiers jours de la semaine.

Les étudiants étaient répartis aléatoirement en deux groupes expérimentaux. Tous les étudiants devaient lire des définitions de concepts de psychologie cognitive. Chaque définition était illustrée par un exemple (mise en situation). Pour le groupe 1, les exemples n'impliquaient pas de consigne supplémentaire d'imagerie mentale de la part des étudiants, et chaque exemple était suivi d'un jugement de compréhension (« indiquez à quel point vous pensez avoir compris l'exemple, de 0 = je n'ai rien compris du tout à 10 = j'ai tout compris, je pourrais l'expliquer à quelqu'un d'autre »). Pour le groupe 2, les exemples impliquaient des consignes d'imagerie mentale sensorielles, motrices et introspectives (émotionnelles) : les étudiants étaient invités à « visualiser », « imaginer », « ressentir », etc. Pour le groupe 2, chaque exemple était suivi d'un jugement de vivacité d'imagerie (« indiquez à quel point vous arrivez à visualiser l'exemple, de 0 = je n'arrive à rien ressentir ou visualiser du tout à 10 = je ressens et visualise l'exemple de manière parfaitement claire, aussi nette et précise qu'une véritable perception »). Ce dernier avait la triple fonction d'orienter les participants vers de l'imagerie mentale (en complément de la consigne précédente), d'évaluer à quel point l'imagerie était utile au rappel ultérieur et enfin de contrôler les habiletés d'imagerie de chacun et pour chaque item.

Dans cette partie nous récoltions les temps de lecture de chaque définition, le niveau de vivacité/compréhension reporté pour chaque concept et leur niveau de révision.

La phase de test

Chaque étudiant s'est vu proposer la deuxième phase de l'expérience par leur enseignant lors de la séance de cours faisant suite au cours magistral du début de la semaine. Pendant le cours, les étudiants devaient se connecter sur un second lien Qualtrics donné par l'enseignant et devaient réaliser trois tests de mémoire. Le premier était un test de rappel dans lequel les participants devaient rappeler le nom des concepts vus dans la première partie. Le deuxième était un test de reconnaissance où ils devaient reconnaître les 10 concepts parmi un ensemble de 20 leurres correspondant soit à de véritables concepts de psychologie (mais non vus dans la première partie), soit des concepts inventés. Le troisième test était une série de 10 QCMs, un pour chaque concept appris, avec six choix à chaque fois. La réalisation de la phase test en séance TD permettait de contrôler le contexte de récupération en mémoire et notamment d'éviter que les participants regardent dans leurs notes de cours ou en ligne pour

aider au rappel. Les étudiants n'avaient pas été prévenus que leur mémoire allait être testée dans cette phase. Il était seulement mentionné dans la première partie qu'il y aurait une seconde partie en classe, sans en préciser la nature.

Dans cette partie nous recueillions le niveau de révision général entre la première et la deuxième partie, le rappel de chaque concept (oui ou non), leur reconnaissance correcte (oui ou non), le temps de reconnaissance, leur score à chaque QCM, le temps de réponse à chaque QCM et le délai entre la première et la deuxième partie.

Matériel

La totalité de l'expérience s'est faite sur la plateforme Qualtrics, accessible depuis l'ordinateur personnel des étudiants, la première partie ayant été depuis leur domicile et la seconde depuis la salle de classe. Le matériel d'apprentissage consistait en dix concepts de psychologie cognitive : la motivation, les tuteurs métacognitifs, le sentiment d'auto-efficacité, quatre autres sous-concepts liés au sentiment d'auto-efficacité et quatre buts d'accomplissement de soi. Chaque concept était défini puis accompagné d'un exemple.

Par exemple, le concept de but de performance-approche avait la définition suivante : *“Un individu est dirigé par un but de performance-approche lorsque la raison qui le pousse à s'engager dans une activité est le désir de montrer aux autres ses capacités en valorisant sa compétence. Il cherche ainsi à obtenir des jugements positifs (comparaison sociale) en montrant qu'il fait mieux que les autres”*. Il était accompagné de cet exemple : *“Vous êtes en TD. La semaine dernière vous avez eu un examen sur table à mi-semester et votre enseignant décide d'afficher le classement des notes de chacun.e des étudiant.e.s. Vous êtes au milieu du classement. Le soir même, vous rentrez chez vous réviser le TD avec pour objectif d'être en haut du classement au prochain examen pour montrer aux autres et à l'enseignant que vous êtes le.a meilleur.e”*. Dans le groupe d'imagerie, une consigne supplémentaire indiquant explicitement de s'imaginer en TD, et l'exemple se terminait par une invitation à de l'imagerie émotionnelle *“Resentez la fierté vous gonfler la poitrine à l'idée d'atteindre ce but”*. Le reste du matériel utilisé pour cette expérience est disponible en annexe.

Résultats

Chaque modèle a été construit en ajoutant progressivement des effets fixes et aléatoires dans les limites de ce que nos hypothèses permettaient et en évitant de conserver des variables secondaires qui ne jouaient pas un rôle significatif. Les effets des variables secondaires telles que le temps de lecture de chaque définition, le niveau de vivacité/compréhension reporté pour chaque concept, leur niveau de révision lors de la première partie et lors de la seconde partie ont été inclus à des fins de contrôle s'ils étaient significatifs. Les statistiques ont été

calculées sur 975 observations (97 participants) pour le rappel, 900 pour la reconnaissance (94 participants) et 974 pour les QCMs (97 participants) pour les QCMs.

Rappel

Du point de vue des statistiques descriptives, la proportion de rappels corrects pour les étudiants du groupe contrôle était de .19 et .25 pour le groupe d'imagerie. Afin de savoir si cette différence était significative, nous avons construit un modèle mixte binomial avec la condition d'apprentissage (contrôle vs imagerie) comme prédicteur principal et le rappel (oui ou non) comme variable expliquée, avec ordonnée à l'origine aléatoire pour les variables participant et concept, le tout en contrôlant l'effet de délai entre la première et la seconde partie, ainsi que le niveau de révision de chaque concept lors de la première partie. Des problèmes de convergence nous ont poussé à choisir entre inclure le niveau de révision lors de la première partie ou inclure celui de la seconde partie. Nous avons choisi de garder le niveau de révision au moment de la première partie, car il présentait plus de valeur prédictive des chances de rappel d'un concept.

Les résultats ont révélé un effet significatif du délai de réponse entre les deux parties, $OR = .37$ [.18, .75], $p = .006$, plus le délai étant long, moins les chances de rappel libre étant élevées. Le niveau de révision des concepts lors de la première partie était la variable ayant le plus de poids dans le modèle, $OR = 2.42$ [1.34, 4.36], $p = .003$, indiquant que le rappel des concepts était surtout déterminé par ce niveau de révision. Ainsi, les étudiants rapportant avoir bien révisé les concepts lors de la première partie avaient plus de chances de se souvenir du nom des concepts dans la seconde partie. En revanche, aucune différence significative n'a été détectée entre les deux conditions d'apprentissage, $OR = 1.49$ [.73, 3.03], $p = .273$.

Reconnaissance

Au niveau descriptif, la proportion de bonne reconnaissance était de .89 pour le groupe imagerie et de .88 pour le groupe contrôle. Aucune variable contrôle n'ayant eu d'effet significatif, nous avons construit un modèle binomial mixte avec seulement la variable condition en effet fixe (avec ordonnée à l'origine aléatoire pour la variable participant et concept). Ce modèle ne nous a pas indiqué d'effet significatif de la condition d'apprentissage, $OR = 1.06$ [.38, 3.01], $p = .908$.

QCM

Les scores des QCMs pouvaient varier de 0 à 1. Les étudiants dans le groupe imagerie avaient en moyenne un score de .60 ($ET = .38$, $Mdn = .67$) aux QCMs contre .54 ($ET = .38$, $Mdn = .50$) pour le groupe contrôle. Afin de tester si cette différence était significative, un modèle linéaire mixte a été construit avec la condition d'apprentissage (contrôle vs imagerie)

comme prédicteur principal et le score au QCM (de 0 à 1) comme variable expliquée, avec ordonnée à l'origine aléatoire pour les variables participant et concept, le tout en contrôlant l'effet du niveau de révision de chaque concept au moment de la première partie de l'expérience. Une nouvelle fois, les conditions d'apprentissage n'ont pas eu d'effet, $b = .06 [-.03, .14]$, $p = .193$, contrairement au niveau de révision, qui présentait une influence positive sur le score au QCMs, $b = .01 [.00, .03]$, $p = .045$, qui est en revanche assez incertain étant donné le 0 contenu dans l'intervalle de confiance.

Discussion

Bien que les statistiques descriptives indiquaient un léger avantage pour le groupe d'imagerie mentale, les résultats des statistiques inférentielles convergent tous vers une même conclusion : l'imagerie mentale n'a pas d'effet significatif sur la mémorisation des concepts à long-terme, autant au niveau du rappel libre que de la tâche de reconnaissance et des QCMs de compréhension. Autrement dit, aucun bénéfice conséquent n'a été observé du côté de la mémorisation des noms des concepts ou de leur compréhension plus profonde (scores aux QCMs).

Pour rappel, au regard de notre hypothèse qui propose que la mémoire repose sur de la simulation des expériences sensorimotrices et émotionnelles, nous nous attendions à ce que l'imagerie mentale lors de l'apprentissage amplifie ces simulations et guide l'apprenant vers les aspects sensori-moteurs et introspectifs à privilégier. Cette condition aurait dû faciliter les apprentissages comparé à un apprentissage sans consigne d'imagerie. Les résultats ne valident pas cette hypothèse pourtant soutenue par la majorité de la littérature en cognition incarnée qui montre des bénéfices intéressants au fait d'utiliser des méthodes d'apprentissage incarnées (Glenberg et al. 2004 ; Macedonia et al., 2020 ; Mathias et al., 2022 ; Schmidt et al., 2019).

Ceci peut être notamment expliqué par le fait que la plupart des études montrant un tel effet d'incarnation utilisent des méthodes impliquant des mouvements physiques de la part des apprenants. Peu d'études ont montré un tel effet pour une imagerie mentale incarnée en contexte d'apprentissage. L'effet incarné de l'imagerie dans des conditions d'apprentissage scolaire semble donc plus difficile à mettre en évidence que les effets incarnés des mouvements et actions réelles en rapport avec les objets d'apprentissage.

Ces résultats ne vont pas non plus dans le sens des études montrant un effet positif de l'imagerie mentale sur la mémorisation de concepts concrets et abstraits et notamment les études présentes dans les articles de cette thèse (chapitre 1, 2 et 3). Il est possible que l'effet incarné de l'imagerie soit trop faible pour être détecté en situation réelle d'apprentissage, où

il y a moins de contrôle que dans les études plus expérimentales telles que celles présentes dans les articles de cette thèse.

Il est possible que l'absence de résultat significatif soit expliqué par le fait que nos deux conditions expérimentales soient proches l'une de l'autre. Nous avons conscience du fait que les participants pouvaient faire de l'imagerie mentale y compris dans la condition contrôle étant donné la présence de mises en situation dans les deux conditions. Nous avons tenu à les inclure dans les deux groupes pour des raisons de contrôle expérimental. Nous ne voulions pas présenter ces mises en situation uniquement au groupe d'imagerie, car elles apportent un nombre non négligeable d'informations supplémentaires. Dans un tel cas, il y aurait eu un déséquilibre trop grand entre les conditions en termes de quantité d'informations reçues. Une différence entre les groupes en faveur du groupe imagerie pourrait donc être attribuée au fait que ce dernier avait simplement accès à plus d'informations. Nous voulions que l'éventuelle différence entre ces groupes soit spécifiquement attribuable à un degré d'imagerie mentale plus haut que dans la condition contrôle. C'est pour cette raison que la quantité d'information est équivalente entre les deux conditions, seules les indications changeaient : l'attention du groupe contrôle était portée sur la compréhension alors que celle du groupe imagerie était tournée vers le fait d'imaginer les sensations procurées par les mises en situation. La limite d'une telle mesure expérimentale est que les participants du groupe contrôle ont dû très probablement imaginer les mises en situations avec une intensité assez proche de celle du groupe imagerie, ce qui rend les potentiels bénéfiques du second groupe d'autant plus complexe à détecter.

Les contraintes pédagogiques représentaient une raison supplémentaire ayant motivé cette proximité entre les conditions. En effet, cette expérience a été mise en place avec la collaboration des responsables de l'unité d'enseignement de psychologie cognitive. Pour des raisons éthiques, le fait de participer à l'expérience devait représenter un bénéfice pour l'apprentissage des étudiants, quel que soit leur groupe expérimental. Ces contraintes ont également limité le choix du matériel d'apprentissage. Les concepts appris devaient être des notions vues en cours au moment du recueil. Ceci a sûrement limité les apports de l'imagerie mentale en termes de mémorisation, étant donné qu'un premier apprentissage avait été effectué en amont et potentiellement poursuivi entre les deux parties de l'expérience.

La plupart du temps, les participants ne se souvenaient globalement pas du nom des concepts, avec des proportions de rappel allant de .19 pour le groupe contrôle à .25 pour le groupe imagerie. Ce taux de réussite relativement bas pour le rappel libre peut s'expliquer par l'absence de consignes explicites de mémorisation. Les autres tests constituaient des mesures plus sensibles à la trace mnésique formée dans la première partie, d'où des performances atteignant quasiment le sans-faute pour la reconnaissance et des scores dépassant les 50% de bonnes réponses pour les QCMs.

Un effet assez persistant à travers les différentes mesures d'apprentissage était le niveau de révision que les étudiants avaient rapporté lors de la première partie de l'expérience pour chacun des dix concepts. Cette variable était la plus déterminante dans la probabilité de se souvenir du concept et de sa définition lors de la seconde partie. Bien qu'aucune hypothèse spécifique ne portait sur cette variable, il est tout de même intéressant de noter que la sensation subjective d'avoir travaillé un concept reflétait les capacités à s'en rappeler au moment des tests d'apprentissage. Par conséquent, il faudra prendre soin de continuer à mettre en place une telle mesure pour les prochains recueils de données. Il faut tout de même noter que les participants ont estimé ne pas avoir révisé la majorité des concepts (avec un score de révision moyen de 1.92/10) au moment de la première partie.

Conclusion & perspectives

En résumé, l'absence de différence significative entre les deux conditions serait moins due au manque d'effet de l'imagerie mentale sur l'apprentissage qu'à la difficulté à allier contrôle expérimental et contraintes pédagogiques. Pour les travaux suivants, il faudra donc veiller à mettre en place des conditions d'apprentissage avec une différence plus marquée dans leur degré d'imagerie mentale. Ceci pourrait être accompli par une consigne d'imagerie plus élaborée ou par une consigne contrôle moins à même de déclencher de l'imagerie mentale. Les mises en situation dans le groupe contrôle pourraient être moins personnelles en se référant moins directement à l'apprenant. Si les exigences pédagogiques le permettent, il faudra également utiliser des concepts qui ne soient pas en lien avec ceux vus en cours pendant la période de recueil, afin d'éviter un effet parasite des connaissances préalables pouvant limiter les gains de l'imagerie mentale en termes d'apprentissage.

Références bibliographiques

- Barsalou, L. W. (2020). Challenges and Opportunities for Grounding Cognition. *Journal of Cognition*, 3(1). <https://doi.org/10.5334/joc.116>
- Barsalou, L. W., Dutriaux, L., & Scheepers, C. (2018). Moving beyond the distinction between concrete and abstract concepts. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B*, 373(1752), 20170144. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0144>
- Bates, K. E., Gilligan-Lee, K., & Farran, E. K. (2021). Reimagining Mathematics: The Role of Mental Imagery in Explaining Mathematical Calculation Skills in Childhood. *Mind, Brain, and Education*, 15(2), 189–198. <https://doi.org/10.1111/mbe.12281>

Borghi, A. M., Binkofski, F., Castelfranchi, C., Cimatti, F., Scorolli, C., & Tummolini, L. (2017). The challenge of abstract concepts. *Psychological Bulletin*, 143(3), 263–292. <https://doi.org/10.1037/bul0000089>

Bower, G. H. (1972). *Mental imagery and associative learning*. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory* (pp. 51–88). John Wiley & Sons

Glenberg, A. M. (2017). How reading comprehension is embodied and why that matters. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 4(1), 5–18. <https://iejee.com/index.php/IEJEE/article/view/210>

Glenberg, A. M. (2022). Embodiment and learning of abstract concepts (such as algebraic topology and regression to the mean). *Psychol. Res.*, 86(8), 2398–2398. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01576-5>

Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S., & Kaschak, M. P. (2004). Activity and Imagined Activity Can Enhance Young Children's Reading Comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 96(3), 424–436. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.424>

Kousta, S.-T., Vigliocco, G., Vinson, D. P., Andrews, M., & Del Campo, E. (2011). The representation of abstract words: Why emotion matters. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(1), 14–34. <https://doi.org/10.1037/a0021446>

Lorayne, H., & Lucas, J. *The memory book*. New York: Stein & Day, 1974

Macedonia, M., Lehner, A. E., & Repetto, C. (2020). Positive effects of grasping virtual objects on memory for novel words in a second language. *Sci. Rep.*, 10(10760), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67539-9>

MacLeod, C. M., Gopie, N., Hourihan, K. L., Neary, K. R., & Ozubko, J. D. (2010). The production effect: Delineation of a phenomenon. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 671–685. <https://doi.org/10.1037/a0018785>

Malinverni, L., & Pares, N. (2014). Learning of Abstract Concepts through Full-Body Interaction: A Systematic Review. *Review Articles in Educational Technology*, 17(4). <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.100>

- Maraver, M. J., Lapa, A., Garcia-Marques, L., Carneiro, P., & Raposo, A. (2021). Imagination Reduces False Memories for Everyday Action Sentences: Evidence From Pragmatic Inferences. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.668899>
- Marre, Q, Huet, N., & Labeye, E. (2021). Embodied mental imagery improves memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 74(8), 1396–1405. <https://doi.org/10.1177/17470218211009227>
- Mathias, B., Andrä, C., Schwager, A., Macedonia, M., & von Kriegstein, K. (2022). Twelve- and Fourteen-Year-Old School Children Differentially Benefit from Sensorimotor- and Multisensory-Enriched Vocabulary Training. *Educ. Psychol. Rev.*, 34(3), 1739–1770. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09648-z>
- McCauley, M. E., Eskes, G., & Moscovitch, M. (1996). The effect of imagery on explicit and implicit tests of memory in young and old people: A double dissociation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 50(1), 34–41. <https://doi.org/10.1037/1196-1961.50.1.34>
- Mueller, J. H., & Jablonski, E. M. (1970). Instructions, noun imagery, and priority in free recall. *Psychological Reports*, 27(2), 559–566. <https://doi.org/10.2466/pro.1970.27.2.559>
- Oliver, M. C., Bays, R. B., & Zabrocky, K. M. (2016). False memories and the DRM paradigm: Effect of imagery, list, and test type. *The Journal of General Psychology*, 143(1), 33–48. <https://doi.org/10.1080/00221309.2015.1110558>
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. Holt, Rinehart and Winston.
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: A virtual reality study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(5), 895–909. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.722657>
- Pressley, M., & Brewster, M. E. (1990). Imaginal elaboration of illustrations to facilitate fact learning: Creating memories of Prince Edward Island. *Applied Cognitive Psychology*, 4(5), 359–369. <https://doi.org/10.1002/acp.2350040502>
- Reggin, L. D., Muraki, E. J., & Pexman, P. M. (2021). Development of Abstract Word Knowledge. *Front. Psychol.*, 0. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.686478>
- Roediger, H. L. (1980). The effectiveness of four mnemonics in ordering recall. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(5), 558–567. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.6.5.558>

- Schmidt, M., Benzing, V., Wallman-Jones, A., Mavilidi, M.-F., Lubans, D. R., & Paas, F. (2019). Embodied learning in the classroom: Effects on primary school children's attention and foreign language vocabulary learning. *Psychology of Sport and Exercise*, 43, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.12.017>
- Slamecka, N. J., & Graf, P. (1978). The generation effect: Delineation of a phenomenon. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4(6), 592–604. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.4.6.592>
- Ulrich, M., Harpaintner, M., Trumpp, N., Berger, A., & Kiefer, M. (2022). Academic training increases grounding of scientific concepts in experiential brain systems. *Cereb. Cortex*, 33(9), 5646–5657. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac449>
- Vigliocco, G., Kousta, S.-T., Della Rosa, P. A., Vinson, D. P., Tettamanti, M., Devlin, J. T., & Cappa, S. F. (2014). The Neural Representation of Abstract Words: The Role of Emotion. *Cereb. Cortex*, 24(7), 1767–1777. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht025>
- Villani, C., Lugli, L., Liuzza, M. T., Nicoletti, R., & Borghi, A. M. (2021). Sensorimotor and interoceptive dimensions in concrete and abstract concepts. *Journal of Memory and Language*, 116, 104173. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104173>
- Wammes, J. D., Meade, M. E., & Fernandes, M. A. (2016). The drawing effect: Evidence for reliable and robust memory benefits in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(9), 1752–1776. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1094494>

DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Synthèse des principaux résultats

Ce travail de thèse visait à démontrer que la pratique de l'imagerie mentale au moment de l'apprentissage permet d'activer une simulation sensorimotrice pouvant, par la suite, être plus facilement rétablie au moment de la récupération, et ainsi favoriser les chances de remémoration. A travers les quatre chapitres de cette thèse, cette hypothèse ainsi que les prédictions telles que formulées dans la section 7.3 de la partie théorique ont été en partie corroborées en mettant en évidence un impact globalement positif de l'utilisation de stratégies d'imagerie mentale sur la mémorisation d'informations verbales.

Dans le Chapitre 1, nous avons pu confirmer l'existence d'un gradient d'efficacité mnésique suivant un continuum d'incarnation, allant de stratégies peu incarnées à des stratégies plus incarnées impliquant une imagerie mentale des interactions sensorimotrices. Ceci est en accord avec la littérature en cognition incarnée sur l'importance des éléments moteurs dans le traitement conceptuel (Onishi et al., 2022 ; Siakaluk et al., 2008 ; Sidhu et al., 2014) et la mémoire (e.g., Dutriaux & Gyselinck, 2016 ; Engelkamp, 1991 ; Guérard et al., 2015 ; Macedonia et al., 2020 ; Witt et al., 2010). L'expérience décrite dans ce chapitre a pu faire ressortir de meilleures performances de rappel immédiat pour les participants ayant généré de l'imagerie visuo-motrice à la première personne comparé à ceux dans les groupes d'imagerie visuo-motrice à la troisième personne et d'imagerie visuelle. Ces groupes étaient à leur tour meilleurs que le groupe en condition contrôle de répétition mentale sans imagerie mentale. Si l'absence de différence entre imagerie à la troisième personne et imagerie à la première personne allait à l'encontre de nos prédictions, les résultats ont néanmoins témoigné de l'importance de la présence d'éléments visuels, moteurs et d'une perspective mentale à la première personne pour maximiser les bénéfices mnésiques de l'imagerie mentale. Si la littérature existante avait déjà montré que faciliter l'accès aux éléments moteurs favorisait la récupération de traces mnésiques, notre article a montré un *continuum* d'incarnation passant par des stratégies n'impliquant pas d'éléments visuels ou moteurs, des stratégies visuelles et enfin des stratégies visuo-motrices avec une perspective mentale à la première personne (maximisant les chances de mise en place de simulations sensorimotrices). Tout en restant au-delà de la répétition mentale, la différence d'efficacité entre les trois types d'imagerie mentale tendait à disparaître au bout de 48 heures. Notons également que les scores de vivacité d'imagerie mentale autant visuelle (mesurées avec le *Vividness of Visual Imagery Questionnaire*) que motrice (mesurées avec le *Vividness of Movement Imagery*

Questionnaire) n'ont pas eu d'impact sur les performances de mémoire dans les différents groupes d'imagerie mentale.

Le deuxième chapitre a confirmé notre prédiction selon laquelle la présence d'éléments sensorimoteurs était d'autant plus utile s'ils étaient intégrés dans une situation cohérente. D'après les performances de rappel recueillies, s'imaginer agir sur un item à apprendre dans une situation d'interaction sociale dans un environnement cohérent augmente la probabilité de rappel par rapport à l'imagerie motrice première personne et l'imagerie visuelle. Cette supériorité de l'imagerie motrice située témoigne de la fonction de la mémoire comme support à l'action située et de la possibilité de déployer davantage le potentiel de l'imagerie mentale incarnée en y ajoutant un aspect situé. Ceci est en accord avec les hypothèses du champ de cognition située telles que formulées par Barsalou (2020 ; Barsalou et al., 2018, section 4.3 et Chapitre 2) notamment. Le traitement conceptuel se baserait sur un système de conceptualisations situées, c'est-à-dire des intégrations d'éléments situationnels (e.g., environnement, actions, affects, buts) liés. En ce sens, l'article peut être considéré comme une preuve démontrant que la récupération des concepts en mémoire est facilitée lorsque les éléments situationnels sont explicitement activés à l'encodage (via l'imagerie mentale située). L'originalité de notre travail réside dans le fait qu'il démontre la possibilité de mobiliser consciemment des éléments situés concernant un concept pour favoriser les chances de mémorisation de ce dernier. Une autre partie des résultats a indiqué une influence des scores d'expériences sensorielles et de manipulabilité (liés aux mots à retenir) spécifiquement dans le groupe d'imagerie motrice située. Ceci constitue un indice complémentaire permettant d'attribuer les bénéfices mnésiques à une simulation mentale d'interactions physiques avec l'objet.

Comme attendu, si l'imagerie mentale s'est révélée pertinente pour la mémorisation de mots concrets, elle l'est également pour la mémorisation de mots abstraits. Dans le chapitre 3, une première expérience n'a pas réussi à mettre en évidence un gain mnésique significatif lors de l'utilisation d'une imagerie située comparé à une stratégie linguistique traditionnelle. C'était cependant le cas dans la seconde expérience qui a montré un impact positif de l'imagerie mentale sur le rappel des mots à moyen et long-terme (et non en rappel immédiat). Les concepts abstraits seraient donc plus facilement récupérables en mémoire lorsque les processus de mémorisation sont explicitement orientés vers leur contenu expérientiel que lorsqu'ils sont orientés vers des caractéristiques plus linguistiques. Une procédure expérimentale complémentaire nous a permis d'affirmer que la condition d'imagerie reposait dans une plus grande mesure sur des expériences visuelles que la condition de création de phrases. En effet, d'après les temps de réponses et les jugements de facilité recueillis, interférer avec les processus visuels durant la mémorisation des mots a davantage parasité l'exécution de la tâche d'imagerie que celle de création de phrases. Ces résultats, attestant de l'importance

des éléments expérientiels dans la mémoire des concepts abstraits, entrent en résonance avec les approches incarnées qui suggèrent que les expériences affectives et intéroceptives (i.e., sensations venant de l'intérieur du corps) sont centrales pour le traitement des concepts abstraits (Barsalou et al., 2017 ; Borghi et al., 2017 ; Liu et al., 2021 ; Kousta et al., 2011 ; Reggin et al., 2021 ; Vigliocco et al., 2014). La spécificité de notre travail par rapport à cette littérature est qu'il montre la possibilité de réaliser de l'imagerie mentale illustrant des concepts abstraits, alors que l'ensemble des travaux en l'imagerie mentale porte exclusivement sur les concepts concrets. Il montre, de surcroît, que cette imagerie mentale peut être utilisée pour efficacement mémoriser les mots reliés à ces concepts.

Enfin, il était prévu que les bénéfices mnésiques issus d'une imagerie mentale incarnée puissent s'appliquer à des situations écologiques. Ainsi, à l'occasion du dernier chapitre, nous avons pu tester le rôle de l'imagerie mentale dans l'apprentissage de concepts (et définitions) de psychologie à l'université (*e.g.*, sentiment d'auto-efficacité, but de performance-évitement), un matériel plus écologique que dans les trois chapitres précédents. Le fait d'explicitement demander aux participants d'imaginer des situations en lien avec les concepts ne les a pas aidés à mémoriser ces derniers comparé à une condition contrôle sans instruction explicite. Cette absence d'application fructueuse nous empêche de corroborer notre hypothèse quant à l'effet bénéfique de l'imagerie en condition d'apprentissage universitaire.

Bien que certains résultats se soient révélés non significatifs, la majorité de ce travail de thèse permet de contribuer à une modélisation incarnée du processus de récupération mnésique car il met en exergue de manière expérimentale l'importance des simulations perceptives, motrices et introspectives pour l'émergence de cette récupération.

2. Implications théoriques

Réflexions théoriques sur les mécanismes à l'origine de l'efficacité de l'imagerie mentale

D'un point de vue plus fondamental, il y a plusieurs manières de se représenter l'effet de l'imagerie mentale sur les processus cognitifs. Que fait l'imagerie mentale à la trace mnésique ? Notre interrogation ici s'articule autour de deux points : L'imagerie mentale ne fait-elle qu'activer ce qui est déjà "présent" dans la représentation du concept à mémoriser ou marque-t-elle, façonne-t-elle un item avec un indice mémorable ? Bien que les présents travaux ne permettent pas de trancher avec netteté, nous pouvons tout de même émettre quelques conjectures sur les mécanismes sous-jacents.

Une première hypothèse d'activation de la représentation de l'item peut être formulée : une consigne d'imagerie mentale pourrait être efficace car elle active davantage la

représentation de l'item que des consignes sans imagerie, rendant ainsi cette représentation plus susceptible d'être récupérée plus tard. Ici, l'indice de récupération est interne à la représentation du concept. Cette approche a notamment été adoptée dans l'article du chapitre 3 : l'imagerie mentale active des informations centrales au concept (les éléments expérientiels), ce qui le rend plus mémorable (lui et son label linguistique). Dans cette perspective, plus une stratégie mnésique active le concept lié au mot, plus elle rend le rappel du mot probable, or les éléments centraux à la représentation du concept sont de nature perceptive, motrice et introspective. Donc une stratégie efficace se devrait d'activer ces éléments expérientiels qui constituent le sens du concept. Cette hypothèse devrait être notamment valide dans les cas où l'imagerie est congruente avec l'item à retenir. Dans cette vision, la tâche de reconnaissance pourrait mesurer la spécificité de l'activation du concept provoquée par l'imagerie : si cette stratégie active d'autres éléments que ceux qui composent la représentation du concept, cela active d'autres concepts partageant ces mêmes caractéristiques, ce qui augmente par conséquent le nombre de fausses reconnaissances.

Une seconde hypothèse de "marquage" de l'item ou d'association à l'item peut être formulée. Cette hypothèse s'applique plus dans les cas où l'imagerie mentale n'est pas sémantiquement liée à l'item à retenir. Dans cette perspective, lors de l'encodage, l'imagerie mentale associe un indice de récupération à l'item, qu'importe si cet indice est lié ou non au sens, à la représentation sémantique du concept. Ici, l'indice de récupération est donc externe à la représentation du concept. L'efficacité d'une stratégie ne serait pas dépendante de l'activation de la représentation du concept mais plutôt de la manière avec laquelle la stratégie marque ou façonne la trace mnésique pour la rendre mémorable. L'efficacité d'une stratégie sera donc déterminée par sa capacité à marquer un item par des éléments qui seront considérés comme utiles et donc "choisis" pour être récupérés au moment du rappel. Par exemple, nous pouvons adopter ce point de vue pour la première étude du deuxième article (Chapitre 2) étudiant l'efficacité d'une imagerie motrice située au regard d'autres imageries non explicitement situées : si de l'imagerie motrice située est faite sur un concept qui n'est pas forcément moteur ou situé à la base, l'imagerie va rajouter un aspect moteur et situé à l'item lors de l'encodage, ce qui crée une trace motrice située qui aura plus de chances d'être récupérée. Cette vision est par ailleurs supportée par les travaux des années 1970 sur l'imagerie mentale traitant de mémoire associative (e.g., les travaux sur la méthode des lieux, Bower, 1970) et mesurant les performances par le biais du rappel indicé où il n'y avait pas d'assomption faite sur la nature fondamentale des processus de mémoire. Ce marquage doit être néanmoins distinctif pour être un moyen de mémorisation efficace. L'efficacité de l'imagerie motrice présentée dans la première étude du deuxième article du Chapitre 2 a sans doute été atténuée par le fait que l'indice de récupération (le geste de lancer) était le même pour tous les items, et donc non distinctif. Ce dernier point a par ailleurs été discuté dans

l'expérience qui suivait. Cette hypothèse de marquage échoue néanmoins à mettre en évidence le fait que l'association entre un geste (l'indice de récupération incarné) et l'item est plus efficace si le lien est signifiant plutôt qu'arbitraire. En effet, s'imaginer manger une banane devrait être une meilleure stratégie de mémorisation que de s'imaginer visser une banane. On pourrait ainsi dire que le marquage "s'emboîte" dans la représentation de l'item d'autant mieux qu'il est lié à la représentation sémantique du concept.

3. Contributions méthodologiques

Démêler l'effet d'incarnation de la profondeur de traitement

Les deux premiers articles (chapitres 1 et 2) de la thèse comparent des groupes d'imagerie et un groupe contrôle sans imagerie. Ce dernier consistait en de la répétition mentale, c'est-à-dire répéter mentalement chaque mot à retenir pendant sept secondes tout en se concentrant sur les aspects phonologiques du mot. Durant cette tâche, la mémorisation est orientée vers des caractéristiques de surface du mot et non sur les caractéristiques de son référent, ce qui limite le traitement sémantique. Ce traitement peut être qualifié de superficiel au sens de Craik et Tulving (1975). À l'occasion des différentes présentations de nos travaux, une limite a été soulevée concernant l'efficacité moindre de la répétition mentale qui pouvait être expliquée non pas par un degré d'incarnation ou d'imagerie mentale moins élevé que les autres conditions, mais plutôt par une profondeur de traitement moins grande. Pour adresser cette critique, il est expérimentalement compliqué de mettre en place une méthodologie séparant clairement l'effet de l'incarnation de l'effet de la profondeur de traitement, car le premier varie mécaniquement en même temps que le second. En théorie, selon la cognition incarnée, plus il y a un traitement du sens d'un mot, plus ce traitement repose sur des simulations sensorimotrices.

La seconde étude du deuxième article de la thèse (chapitre 2), mettait en place une variation du degré de distinctivité motrice et situationnelle en comparant une imagerie motrice située avec actions peu distinctives et situations distinctives (IMS⁺), avec actions distinctives et situations peu distinctives (IM⁺S) et enfin avec actions distinctives et situations distinctives (IM⁺S⁺). Au-delà de la distinctivité, ce protocole nous a permis de comparer des conditions équivalentes sur le plan de la profondeur de traitement. En effet, ces trois conditions variaient uniquement sur la forme des composantes motrices et situées, elles consistaient toutes les trois en une imagerie composée d'un élément moteur (une action, distinctive ou non) et d'un élément contextuel (un environnement, distinctif ou non). Ainsi, une condition n'était pas plus « sémantique » qu'une autre et le degré d'élaboration mentale nécessaire était équivalent à travers ces trois groupes d'imagerie.

Une approche différente a été adoptée dans le Chapitre 3. Pour rappel, nous avons réussi à trouver une différence significative entre une stratégie d'imagerie mentale et une stratégie linguistique de création de phrases, soit deux conditions avec un niveau de profondeur relativement équivalent. Le niveau de profondeur était effectivement plus équilibré que lors des comparaisons entre répétition mentale et imagerie mentale, car intégrer un mot dans une phrase demande un traitement sémantique de ce mot au même titre que l'imagerie mentale.

L'impact de la crise de la répliquabilité sur notre méthodologie

La validité scientifique de notre travail est en partie déterminée par la capacité de ce travail à être répliqué à partir d'autres recueils de données. Or, le manque de répliquabilité, par ailleurs souvent invisibilisé par des biais de publication, est un problème touchant la psychologie dans son ensemble. Des études avec une puissance statistique suffisante devraient produire un taux de répliquabilité de 80%, là où en réalité, elles n'en accomplissent que 40% (Brysbaert & Stevens, 2018). Une des réponses face à la crise de répliquabilité a notamment été de mettre en évidence la planification de la taille d'échantillon en fonction de la taille d'effet attendue (calcul de taille d'échantillon a priori). Généralement, plus il y a de participants, plus il y a de chances de trouver l'effet attendu. Le coût que représente le recrutement de participants limite cependant les tailles d'échantillon atteignables. Pour contourner ce coût, nous avons choisi, dans le troisième article, d'augmenter le nombre d'observations par participant par rapport aux précédentes expériences, ce qui consiste concrètement à augmenter le nombre de mots à mémoriser. Ce nombre est passé d'une vingtaine dans les précédentes expériences à 60 mots par participant. Pour prendre en compte cette quantité de données, nous avons considéré le plus petit niveau d'analyse, soit une base de données composée de 60 lignes d'observation x le nombre de participants. Ceci nous a permis d'éviter de "compresser" les données en calculant par exemple un score par participant (qui aurait abouti à un tableau composé d'une ligne d'observation par participant).

Une telle structuration des données appelle à modifier certaines habitudes d'analyses statistiques. Nous ne comparons plus des performances moyennes entre les différents groupes de stratégies mais des chances de rappeler un mot lorsqu'un participant était dans tel ou tel groupe, ce qui nous pousse à calculer des *Odds Ratios* (i.e., la cote de rappel, soit les chances de rappeler le mot sur les chances de ne pas le rappeler). De plus, une base de données organisée en blocs de 60 lignes nécessite la prise en compte de ce groupement dans les analyses. Une telle demande peut être assurée par les modèles mixtes qui prennent en compte le fait que chaque ligne d'observation n'est pas indépendante.

L'utilisation de modèle mixte avec ce type de base de données amène certains avantages, le principal étant la possibilité de prendre en compte l'impact des caractéristiques

psycholinguistiques de chaque mot présent dans le matériel expérimental. Malgré cela, cette organisation des données contraint les possibilités méthodologiques, notamment la possibilité de faire de l'apprentissage incident. En effet, évaluer le rappel de 60 mots alors qu'il n'a pas été explicitement demandé aux participants de les mémoriser provoquerait des performances très basses et un effet plancher abolissant les chances d'observer une différence entre des groupes.

4. Limites

Un bénéfice réservé aux performances de rappel

Le périmètre de nos conclusions sur l'efficacité de l'imagerie mentale se limite aux performances de rappel libre. Les analyses sur les nombres de reconnaissances correctes et incorrectes se sont révélées infructueuses. La trop grande facilité de ces tests était en cause. Malgré une construction contrôlée des tests de reconnaissance qui comportaient des leurres associés sur la base de normes de similarité, le test de reconnaissance s'est avéré toujours trop facile. Afin de détecter des différences sur la performance de reconnaissance, un délai plus long serait nécessaire entre le moment de l'apprentissage et le moment de la reconnaissance.

Réflexions sur la pertinence de la mesure de la performance par rappel de mots

Le travail réflexif mené sur les expériences de cette thèse fait émerger une interrogation quant au fait d'utiliser des mesures de rappel strict de mots pour mesurer les performances mnésiques. Il convient de questionner notre centre d'intérêt. Est-il important d'évaluer la rétention des mots ou la rétention des concepts ? Par « concept » nous entendons la représentation mentale de l'objet auquel fait référence le mot. Pour une même représentation visuelle peuvent correspondre plusieurs mots. Or, au cours des différentes expériences menées pendant la thèse, nous avons adopté une notation "stricte" pour le rappel libre : nous avons considéré qu'une réponse était correcte si le mot rappelé était sous la forme linguistique exacte du mot présenté à l'origine (en corrigeant les erreurs d'orthographe). Mais il est possible d'envisager que le rappel d'un mot proche, c'est-à-dire ayant le même radical et, par exemple, un suffixe différent, reflète une mémorisation correcte du concept présenté en phase d'apprentissage : une même image mentale de tyran peut correspondre aux mots « tyran », « tyrannie », « tyrannique ».

Au cours des deux expériences du troisième article, les participants devaient mémoriser 60 mots selon une stratégie de création de phrases ou d'imagerie mentale puis les restituer dans une tâche de rappel libre. Les résultats rapportaient une absence de différence entre les deux groupes de stratégie en rappel immédiat. Cette différence devenait significative,

en faveur du groupe d'imagerie mentale, lorsqu'une notation plus souple était adoptée, c'est-à-dire en considérant le rappel comme correct si le radical était préservé, comme "tenter/tenté-e-s/tentation" ou "réconciliation/réconcilier/réconcilié-e-s". Les participants se souvenaient mieux des mots en condition d'imagerie mentale qu'en condition linguistique si l'on considérait la forme dérivée comme appartenant au concept. Les participants en condition d'imagerie étaient en effet plus susceptibles que les autres participants de se souvenir du mot optimisme lorsque la forme dérivée comme "optimiste" était identifiée comme une bonne réponse. Ceci témoigne du fait que le concept d'optimisme a malgré tout été activé. Notre méthode de notation stricte tend sans doute à sous-estimer les performances de rappel libre dans ce groupe d'imagerie.

Par ailleurs, les confusions telles que "optimiste" au lieu de "optimisme" ou "tyrannique" au lieu de "tyrannie" peuvent nous renseigner sur la manière dont l'imagerie mentale de concepts abstraits est réalisée. Plutôt que d'imaginer une situation générale d'optimisme ou de tyrannie, les participants ont peut-être préféré imaginer quelqu'un ou eux-mêmes en train d'être tyrannique ou optimiste, c'est-à-dire un état affectif spécifique, ce qui soutiendrait l'importance des composants affectifs dans la représentation des concepts abstraits (e.g., Kousta et al., 2011 ; Vigliocco et al., 2014).

Le rôle des états introspectifs dans la mémoire

L'hypothèse des simulations incarnées distingue souvent trois catégories d'expériences (e.g., Barsalou, 2008) dans lesquelles peuvent s'ancrer la cognition : les expériences perceptives (e.g., visuelles, auditives), motrices et introspectives. Cette dernière catégorie peut comprendre les affects (émotions primaires, secondaires, sentiments, humeur), les motivations, etc. Ces expériences sont souvent moins étudiées dans le cadre de la cognition incarnée, sans doute parce qu'elles sont moins facilement objectivables.

Etant donné que les émotions produisent des réponses physiologiques, elles sont parfois étudiées par le biais de l'intéroception, c'est-à-dire, les sensations provenant de l'intérieur du corps (e.g., les sensations liées au système cardiovasculaire, respiratoire, gastro-intestinal, la vessie, la faim, la soif, la température, la douleur, les sensations génitales). Pour Connell et al. (2018), ces expériences intéroceptives offrent un terrain d'ancrage plus propice à la représentation des concepts abstraits que des concepts concrets. Lorsque des participants sont interrogés sur le degré auquel ils expérimentent des mots par le biais de sensations intéroceptives (force intéroceptive), ils relient plus volontiers les mots abstraits (e.g., agonie, chaleur, orgasme, diabète, somnolent, colère) à ces sensations que les concepts concrets. C'est également sous cet angle physiologique qu'a choisi Antonio Damasio (1996) d'étudier les émotions avec sa théorie des marqueurs somatiques. Pour le traitement sémantique de mots émotionnels (concrets et abstraits), l'équipe de Niedenthal (2009) a également montré une

activation spontanée des muscles faciaux engagés dans l'expression faciale des émotions appropriées aux mots (e.g., l'activation du corrugateur des sourcils pour des mots comme "furieux" est plus grande que pour "joyeux" pour lequel ce sont plutôt les zygomatiques qui s'activent). Ce traitement sémantique était perturbé lorsque ces muscles étaient bloqués. D'autres auteurs ont étudié le rôle particulier qu'avait la valence émotionnelle (i.e., score continu allant de neutre émotionnellement à très négatif/positif) dans le temps de traitement des concepts abstraits (Kousta et al., 2011) ainsi que le rôle de certaines structures cérébrales comme le cortex cingulaire antérieur rostral (Vigliocco et al., 2014).

Les expériences du chapitre 3 qui portaient sur la mémoire des concepts abstraits, ont nécessité un travail préalable de recueil de normes de catégorisation de mots abstraits. À l'issue de notre recueil, nous avons pu personnellement constater qu'une quantité non négligeable des concepts étaient hautement associés aux émotions : 20% (parmi les 262 mots pour lesquelles des normes ont été recueillies) ayant un score moyen au-dessus de 50/100 pour la dimension émotionnelle. Ayant utilisé ces mots dans le matériel expérimental du troisième article, où ils constituaient plus de la moitié du matériel, les émotions ont nécessairement joué un rôle dans la représentation des concepts (d'autant plus dans le groupe d'imagerie mentale puisque la consigne impliquait une imagerie sur les états introspectifs) et par conséquent sur leur mémorisation. Comme il a été discuté dans l'article, une interférence avec le contenu émotionnel des concepts aurait pu avoir un effet plus direct sur la performance, mais seule une interférence visuelle a pu être mise en place.

Expérience sur l'efficacité d'une imagerie motrice émotionnelle

Le rôle des expériences introspectives a néanmoins pu être investigué dans une expérience non présentée dans cette thèse (cette expérience a été présentée lors du colloque Human Embodied Cognition à Montpellier, Marre et al., 2020). Cette expérience avait pour but de tester le rôle de l'émotion sur l'efficacité mnésique de l'imagerie mentale. Logiquement, en suivant les hypothèses du champ de la cognition incarnée, si la récupération nécessite la simulation d'états perceptifs, moteurs et introspectifs, un encodage se focalisant sur tous ces aspects-là devrait produire une récupération plus facile qu'un encodage se focalisant uniquement sur une simulation perceptive et motrice (e.g., imagerie visuo-motrice) ou une simulation perceptive (e.g., imagerie visuelle).

Afin de tester cette hypothèse, nous avons recruté 208 participants pour une étude en ligne. Les participants devaient d'abord écouter une liste d'entraînement de 10 mots et suivre une consigne particulière pour chaque mot afin de répondre à une tâche de vérification. Cinq groupes ont été constitués avec chacun une consigne différente :

- Soit répéter mentalement chaque mot, puis répondre à des questions phonologiques sur le mot ;

- Soit trouver un synonyme pour chaque mot, puis écrire le synonyme trouvé
- Soit visualiser chaque mot, puis répondre à des questions sur les caractéristiques visuelles de l'image imaginée ;
- Soit imaginer jeter chaque objet auquel se référait le mot, puis répondre à des questions sur les caractéristiques de l'action imaginée ;
- Soit imaginer manger chaque objet auquel se référait le mot (i.e., une action jugée plus émotionnellement connotée que celle de jeter), puis répondre à des questions sur les sensations et émotions procurées.

Ces questions portant sur chaque mot servaient à vérifier que les participants avaient effectué ce qui leur était demandé dans les consignes. S'en suivait une liste de 25 mots avec les mêmes consignes d'activités mentales. Cette fois-ci, au lieu d'avoir la tâche de vérification, ils avaient un test de rappel libre, ce qui faisait de cette partie de l'expérience une tâche d'apprentissage incidente. Parmi les mots qu'ils avaient rappelés, ils devaient ensuite les organiser selon l'ordre dans lequel ils se rappelaient les avoir entendus. Ils devaient ensuite reconnaître les mots réellement présentés parmi un ensemble de leurres. Enfin, leurs habiletés d'imagerie visuelle et motrice étaient évaluées.

Les résultats n'ont pas confirmé les hypothèses, dans la mesure où il n'y a pas eu de différences significatives entre la recherche de synonymes, l'imagerie visuelle, l'imagerie visuo-motrice et l'imagerie visuo-motrice émotionnelle sur le plan du rappel libre, du rappel sériel (nombre de mots rappelés dans l'ordre et erreurs de positionnement) et de la reconnaissance. La seule différence significative était pour le groupe de répétition mentale, qui sous-performait par rapport aux quatre autres groupes.

Le rôle des émotions, et notamment de la surprise dans l'effet mnésique de l'imagerie mentale, avait en réalité déjà été indirectement investigué par la littérature sur l'effet "d'étrangeté" (*bizarreness effect*). Nos résultats font écho au manque de répliation dans cette littérature. McDaniel et Einstein (1986) soutiennent qu'une imagerie mentale bizarre peut améliorer les performances mnésiques dans des conditions assez précises : il faut qu'elle soit utilisée dans un contexte d'apprentissage où de l'imagerie non bizarre est aussi utilisée, de manière à ce que l'imagerie bizarre soit distinctive (e.g., dans le cadre d'une manipulation intra-sujet, faire de l'imagerie non bizarre pour neuf phrases et de l'imagerie bizarre pour une phrase). Cette littérature étant inconnue au moment du recueil de données, la méthodologie n'a pas pu tenir compte des problématiques qu'elle soulevait. Notre étude avait cependant le mérite de mettre en lien ces aspects émotionnels de l'imagerie avec la cognition incarnée, ce qui, à notre connaissance, n'est pas établi dans la littérature sur l'effet d'étrangeté. Même récemment, le fait qu'une interférence visuelle n'atténue pas l'effet mnésique de l'imagerie bizarre (Besken et al., 2022), n'est pas mis en lien avec le fait que l'effet d'étrangeté trouve sa source ailleurs, potentiellement dans les émotions, d'où l'absence d'effet d'interférence

purement visuelle. Pour nous, cet effet d'étrangeté montre que la récupération des mots met en jeu la reviviscence de l'état introspectif de l'encodage, ici la sensation d'étrangeté.

Quid des différences interindividuelles ?

La variabilité dans les habiletés d'imagerie mentale. L'objectif de cette thèse consistait à tester l'efficacité de l'imagerie mentale sur la mémoire tout en montrant la nature incarnée des processus mnésiques. Les hypothèses portaient sur le fonctionnement général de la cognition humaine, impliquant alors que cette nature incarnée soit une caractéristique commune aux individus. L'approche générale de cette thèse était de trouver ce qu'il y avait de commun entre les êtres humains plutôt que de chercher leurs spécificités.

Néanmoins, chaque individu varie dans sa capacité à pouvoir imaginer. Nous avons pu l'observer sur les données du VVIQ (*Vividness of Visual Imagery Questionnaire*), utilisé à plusieurs reprises durant la thèse dans les chapitres 1 et 2. La distribution de ces scores était gaussienne, ce qui indique une répartition plutôt équilibrée autour de la moyenne. Il n'y avait pas de division entre des personnes rapportant de faibles habiletés d'un côté, et d'autres rapportant un haut niveau de vivacité (distribution bimodale) ou d'asymétrie particulière. Dans tous les cas, quel que soit le score des participants au VVIQ, il n'a pas joué un rôle dans leurs performances de rappel, que ce soit pour les groupes contrôles sans imagerie (type répétition mentale) ou les groupes d'imagerie. Une première interprétation de ces résultats peut être que les individus ne se distinguent pas sur leurs habiletés d'imagerie. Les variations interindividuelles seraient trop faibles pour significativement distinguer les individus. Si tel est le cas, est-il possible d'entraîner et d'améliorer ces habiletés ?

D'un autre côté, l'absence apparente du rôle des habiletés d'imagerie peut être envisagée comme liée aux limites méthodologiques de l'outil que nous utilisons pour ces mesures, le VVIQ. En effet, ce questionnaire déclaratif n'était peut-être pas à même de détecter un tel effet dans nos expériences. Ce questionnaire consiste en une série de questions, indépendantes du matériel expérimental utilisé pour les tâches de mémoire. Les résultats exposés dans les Chapitres 1, testant un continuum d'incarnation de l'imagerie mentale allant jusqu'à l'imagerie motrice à la première personne, et 2, testant l'impact mnésique de l'ajout d'une dimension située à l'imagerie, soulignent que les scores du VVIQ ne prédisaient pas les probabilités de rappel des mots présentés dans la tâche expérimentale. Certains éléments de littérature nous ont permis de nous tourner vers d'autres mesures, comme les mesures de vivacité par item (*trial-by-trial*, Runge et al., 2015). Ce type de mesures a été implémenté dans le troisième article de la thèse Chapitre 3, pour évaluer dans quelle mesure les participants parvenaient à imaginer chaque situation.

Les résultats montrent que cette mesure par item prédit efficacement la performance de rappel, contrairement aux scores de VVIQ des deux articles précédents. Avec ces scores,

nous avons observé que plus les participants arrivaient à produire une image de chaque situation, plus ils parvenaient à se souvenir du mot associé à la situation. Ce score était, par ailleurs, l'un des prédicteurs ayant le plus de poids dans les modèles statistiques expliquant la performance de rappel. Pour les modèles indiquant un effet significatif de la stratégie de mémorisation (en faveur de l'imagerie mentale), l'ajout de ce score de vivacité n'a pas fait disparaître l'effet de la stratégie, ce qui indique que la facilité à créer une imagerie claire n'explique pas à elle seule la performance et que la stratégie utilisée (imagerie ou phrases) est déterminante dans la probabilité de rappel. Autrement dit, bien qu'il existe un effet des capacités à créer des images claires, variant entre les individus et entre les items pour une même personne, il existe concomitamment un effet bénéfique général à l'utilisation de l'imagerie mentale par rapport à une stratégie n'en impliquant pas.

Pour finir, il est intéressant de noter que l'exploration des pathologies pourrait apporter un éclairage supplémentaire quant à l'impact des habiletés d'imagerie mentale sur les capacités de mémorisation. En effet, si l'on devait identifier une circonstance où l'influence de l'imagerie mentale est significativement altérée, celle-ci s'appliquerait incontestablement à la population aphantasique. L'aphantasie est l'incapacité à générer de l'imagerie mentale visuelle. Elle peut se traduire par des scores quasi-nuls dans les questionnaires auto-rapportés d'imagerie mentale comme le VVIQ (Zeman et al., 2015) mais également au niveau des mesures comportementales : les participants aphantasiques sont insensibles aux effets d'amorçage de l'imagerie mentale sur la perception visuelle (voir Keogh & Pearson, 2018, pour une preuve expérimentale utilisant un paradigme de rivalité binoculaire). En 2020, Dawes et collaborateurs ont montré les conséquences de l'aphantasie sur le reste de la cognition. Leurs habiletés d'imagerie mentale semblent dégradées dans les autres modalités (auditive, tactile, kinesthésique, gustative, olfactive et émotionnelle). Ces personnes ont également rapporté avoir des déficits au niveau de leur mémoire épisodique et prospective, ce qui met en évidence l'importance de l'imagerie mentale dans ces domaines de la cognition. Un peu plus d'un quart des individus interrogés ont rapporté n'être capable d'aucune forme d'imagerie quelle que soit la modalité.

Nous pourrions prédire sans trop de risque que, chez les sujets aphantastiques, les caractéristiques visuelles de l'imagerie mentale, ne pouvant être générées, n'auraient aucun rôle dans la mémorisation et la récupération des traces mnésiques. L'incapacité de se reposer sur des indices de récupération sensoriels devrait perturber leurs performances mnésiques. Leurs déficits d'imagerie dans le reste des modalités sensorimotrices rendent également difficile une stratégie d'imagerie alternative basée sur une modalité autre que visuelle avec, néanmoins, la possibilité d'utiliser de l'imagerie spatiale qui resterait intacte chez ces personnes. En effet, leurs capacités d'imagerie spatiale seraient globalement préservées face à des sujets contrôles (pour des réponses à des items comme "Je suis un·e bon·ne joueur·se de

Tetris”, Dawes et al., 2020). Faisant écho à ceci, au-delà des cas extrêmes d’aphantasie, Palmiero et collaborateurs (2019) évoquent l’idée qu’il y aurait, chez les sujets neurotypiques, des profils de personnes avec des habilités limitées d’imagerie d’objet (i.e., imaginer la forme, la taille, la couleur, la luminosité des objets) et donc plus tournées vers l’imagerie spatiale (qui est typiquement impliquée dans les tâches de rotation mentale et qui consiste à imaginer les relations spatiales entre les objets ou parties d’un objet, le mouvement des objets, leur localisation dans l’espace), cette dernière étant considérée comme une représentation plus abstraite des objets. Quoi qu’il en soit, ces cas posent un challenge, non seulement pour l’approche soutenue dans cette thèse, mais également pour la cognition incarnée toute entière.

De possibles variations inter-individuelles dans les modes d’ancrage. Au-delà des habiletés d’imagerie mentale, les individus peuvent sans doute également varier dans leurs stratégies d’ancrage, c’est-à-dire le mode dans lequel le système cognitif des individus représente le sens du langage. Il serait attendu que la plupart des personnes ancre le sens du mot « courir » dans les expériences motrices créées lors de la course alors que les personnes n’ayant pas la capacité d’utiliser leurs jambes ancreraient ce sens dans les expériences visuelles créées lors de l’observation d’autres personnes qui courent. Cette différence d’ancrage pourrait également apparaître entre novices et experts d’un domaine : le sens du mot "crochet" n’engage pas le système moteur des personnes n’ayant jamais boxé au même degré que celui de boxeurs professionnels ou d’experts de la couture. Prinz soutient notamment que la compréhension des mots s’effectue par le biais de différentes stratégies de “suivi” qui peuvent consister en un ancrage dans des scénarios concrets, des projections métaphoriques, des références aux états internes et aux émotions ou encore une recherche dans un réseau d’associations linguistiques. De ce fait, pour une même tâche, différents individus pourraient utiliser des simulations sensorimotrices moins directement que d’autres. Cela peut expliquer pourquoi certaines études (utilisant des paradigmes d’amorçage par exemple) ne parviennent pas à détecter de simulation incarnée là où la théorie supposerait qu’il y en ait.

Les individus peuvent également afficher des comportements diamétralement opposés aux tentatives de manipulations expérimentales de la part des chercheurs. Ce phénomène apparaît par exemple dans les paradigmes d’amorçage avec la rivalité binoculaire dont nous avons parlé dans la partie théorique de la thèse (section 5.3, p. 29). Dans ce type d’expérience, il est attendu que le fait d’imaginer une couleur particulière (par exemple, rouge) en amont de la présentation des stimuli (“mélange” perceptif” de bleu et rouge) facilite la perception du stimulus de cette même couleur (le stimulus rouge). Les statistiques de Dijkstra et collègues (2019) au niveau global échouent cependant à mettre en évidence cet effet d’amorçage. Si pour la plupart des participants l’imagerie mentale a bel et bien un effet d’amorçage (i.e., imaginer le stimulus rouge augmente la probabilité de le voir lors de sa présentation simultanée avec un

stimulus bleu), pour une bonne partie, c'était un effet d'adaptation qui diminuait la probabilité de percevoir le stimulus correspondant à la couleur imaginée. Le fait qu'il y ait eu ces deux tendances au sein de l'échantillon a empêché la détection d'effets d'amorçage à l'échelle de l'échantillon tout entier.

Pour finir sur les variations inter-individuelles dans les modes d'ancrage, nous pouvons ajouter qu'il semblerait que les habiletés d'imagerie mentale soient corrélées au positionnement théorique des chercheurs dans le débat sur l'imagerie dans les années 1980. Reisberg, Pearson et Kosslyn (2003) ont sondé 150 chercheurs en psychologie, philosophie et neurosciences et ont trouvé que les chercheurs ayant de faibles scores au VVIQ se situeraient plutôt sur le versant propositionnel, tandis que ceux ayant de plus haut scores se situaient sur le versant analogue. Est-ce le positionnement théorique qui a influencé les habiletés d'imagerie ou les habiletés d'imagerie qui ont déterminé le positionnement théorique ? De toute évidence, ces résultats ne permettent pas de déterminer le sens de la causalité, bien que la deuxième option semble plus parcimonieuse. Se pourrait-il qu'un tel phénomène détermine également notre positionnement théorique plus ou moins incarné ? Serait-il possible que notre orientation vers une vision incarnée ait été déterminée par notre propension à plus utiliser des simulations incarnées que d'autres personnes ? Nous pouvons penser que, par rapport aux années 1980, la quantité de plus en plus abondante de données scientifiques limite la possibilité de s'orienter vers un champ de recherche en se reposant uniquement sur son instinct.

Le rôle de l'information linguistique dans la mémoire des concepts abstraits

Comme précisé dans la conclusion du troisième article (Chapitre 3), les expériences menées à l'occasion de cette thèse ne démontrent en aucun cas l'inutilité du langage. De plus en plus de modèles dits hybrides font un compromis entre théories incarnées et modèles linguistiques distributionnels, l'un des plus connus étant celui décrit par l'hypothèse de l'interdépendance des symboles de Louwerse (2018). Le système cognitif enregistre des régularités statistiques dans l'occurrence d'informations linguistiques, et notamment la co-occurrence des mots dans un même espace et dans une période temporelle. Les symboles linguistiques seraient alors interconnectés dans un réseau linguistique avec des relations plus ou moins fortes en fonction de similarités de contiguïté spatiale et temporelle. L'information perceptuelle répondrait aux mêmes lois de contiguïté (des objets sont très reliés s'ils apparaissent souvent ensemble). Ces deux réseaux de symboles seraient interdépendants : un mot utilisé régulièrement dans un même contexte perceptif sera automatiquement relié à ce dernier. "Si un mot n'est jamais utilisé dans un contexte perceptif, établir le sens du mot est difficile" (Louwerse, 2018, p. 586) et il est donc probable que le traitement du mot se repose uniquement sur le réseau linguistique distributionnel. De par ce lien statistique entre langage

et objets/événements dans le monde physique, les mots peuvent servir d'indices qui influencent nos processus prédictifs. La perception d'une information linguistique peut donc amorcer, préparer la perception de l'objet approprié. Les mots peuvent servir de "pointeurs" vers des simulations spécifiques et peuvent guider notre perception dans un environnement bruyé (Lupyan & Clark, 2015 ; Lupyan & Ward, 2013). De toute évidence, si ces symboles linguistiques sont des pointeurs, c'est qu'ils ne se suffisent pas à eux-mêmes. Ils ne peuvent pas "flotter" sans ancrage dans une représentation non-linguistique, sans quoi ils seraient amodaux, ce qui poserait un problème d'ancrage des symboles discuté dans la partie théorique de cette thèse (dans la section 2.1. La philosophie et l'ancrage des symboles, p. 8). L'information linguistique n'est rien sans quelque chose à quoi la relier, elle n'est qu'un intermédiaire vers l'information sensorimotrice et ne peut s'ancrer uniquement dans un réseau d'autres symboles linguistiques (cf. la vision de Zwaan, 2016, dans la partie "Concept abstraits et contexte", p. 166).

Pour des auteurs comme Anna Borghi, il semblerait que les concepts abstraits aient un lien particulier avec le langage. Comparés aux concepts concrets, ils seraient plus ancrés dans les processus articulatoires responsables de la production et les processus auditifs engagés dans le traitement des caractéristiques phonologiques du langage (Borghi et al., 2017). Enfin, les expériences langagières sont de plus très liées aux interactions sociales. Le sens des mots abstraits est transmis via un input linguistique indirect là où les concepts concrets sont plus acquis via l'expérience sensorimotrice directe avec l'objet de référence. De plus, leur sens est régulièrement renégocié par le biais du langage intérieur ou en communiquant avec d'autres personnes, ce qui produit un ancrage particulièrement fort de ces concepts dans les expériences sociales. Donc, outre cet aspect distributionnel, les informations linguistiques sont considérées par certains auteurs comme revêtant un aspect sensorimoteur (précisément auditivo-articulatoire) et social, elles ne sont pas amodales.

Les études portant sur les concepts abstraits contenues dans cette thèse ne permettent pas d'évincer le rôle des informations linguistiques dans la mémorisation des concepts abstraits bien qu'elles en atténuent l'importance. Il est par ailleurs tout à fait possible que des informations linguistiques soient impliquées dans l'imagerie mentale située que nous avons demandée aux participants de mettre en place. Pour le mot "pacte" par exemple, les participants ont pu s'imaginer discuter avec quelqu'un. Et cela vaut pour tous les mots sociaux étant donné qu'il faut imaginer des situations qui impliquent des interactions humaines. Ces situations sociales impliquent très probablement une discussion avec une autre personne. Lors de la récupération de ces mots, les participants ont potentiellement pu se rappeler d'eux grâce à des éléments de leur discussion imaginaire. Cet aspect linguistique a très probablement été inhibé par le fait qu'il était indiqué aux participants de se concentrer sur les aspects visuels et émotionnels ainsi que de donner une réponse de clarté dans un délai relativement court. Il

peut être néanmoins intéressant d'évaluer dans quelles mesures les éléments linguistiques de l'imagerie mentale jouent un rôle dans la mémorisation de ces concepts ; une interférence du même type que celle déjà testée dans la deuxième expérience du Chapitre 3, mais cette fois-ci centrée sur les aspects linguistiques. Ce point est discuté plus amplement dans les perspectives.

Concepts abstraits et contexte

Il est possible que les concepts abstraits soient “vides” sans leur contexte. Si un concept “soutient l'action efficace d'un agent incarné intégré dans l'environnement physique et social” (Barsalou et al., 2018, p. 1), alors il y a une nécessité pour toute démarche expérimentale d'étudier les concepts en contexte. Les concepts sont rarement traités de manière isolée. Leur label linguistique est souvent présenté dans un contexte linguistique (intégré dans des phrases) ou physique (un panneau, une discussion par rapport à un objet ou un événement présent). Étudier ces concepts de manière décontextualisée pourrait mener à des résultats qui reflètent assez peu leur traitement en temps normal et donc mener à des conclusions peu écologiques. C'est pour cette raison là que dans les expériences du Chapitre 2, nous avons présenté les mots à apprendre accompagnés d'articles indéfinis (un, une, de), ce qui a également permis de lever l'ambiguïté sur certains mots polysémiques. Dans le Chapitre 3, malgré une présentation relativement décontextualisée, nous avons veillé à ce que les traitements cognitifs engagés dans les deux groupes soient situés (création de phrases et imagerie mentale située) afin d'assurer un traitement sémantique de qualité équivalente.

Cette importance du contexte est d'autant plus prégnante dans le cas des concepts abstraits. Comme Gary Lupyan, mentionné ci-dessus dans la partie sur le rôle de l'information linguistique dans la mémoire des concepts abstraits, qui proposait que les symboles linguistiques pouvaient servir de “pointeurs”, Zwaan (2016) suggère que les concepts abstraits peuvent pointer vers des simulations multimodales de deux manières différentes. Ils peuvent être utilisés de manière cataphorique pour “intégrer de l'information à venir dans une simulation sensorimotrice” (p. 1). Par exemple, dans un texte commençant par “Aujourd'hui, la justice a été rendue” suivi d'une description d'un procès dans un tribunal, le mot “justice” garde de la place en mémoire de travail le temps que le reste de la situation soit dévoilée dans la suite du texte. Il reste vide de sens tant que son sens n'est pas spécifié plus tard dans le texte. Un symbole linguistique peut également renvoyer à une situation de manière anaphorique pour “intégrer de l'information précédemment présentée dans une simulation sensorimotrice” (p. 1). Prenons l'inverse du dernier exemple, soit un texte décrivant une scène de procès se terminant par la phrase “Aujourd'hui, la justice a été rendue”. Dans ce cas, le concept abstrait de justice n'est pas contenu par le seul mot “justice”, il est défini par la simulation générée par la situation exposée précédemment dans le texte. Par conséquent, le mot “justice” présenté

seul n'active pas vraiment le concept de justice à proprement parler. Il active des informations très peu spécifiques, très vagues, qui ne pourraient s'apparenter à un véritable traitement conceptuel. Dans tous les cas, ces concepts abstraits trouvent leur sens uniquement lorsqu'ils sont liés à une simulation incarnée d'une situation. En revanche, pour pouvoir pointer vers un contenu contextuel, il faut qu'il en existe un au préalable. Dans la mesure où les concepts abstraits peuvent être considérés comme de l'information linguistique "vide" à la manière de Zwaan, ceci met bel et bien en exergue les limites des tentatives expérimentales consistant à présenter des mots abstraits isolés. Le manque de corroboration des hypothèses incarnées sur le traitement du langage pourrait dans certains cas être expliqué par ce manque de contexte dans la présentation des stimuli. Pour ces raisons, nous envisageons l'ajout d'un contexte autour des mots abstraits que nous étudierons dans de prochaines expériences.

5. Perspectives

Nous prévoyons de poursuivre le travail entamé sur l'application de l'imagerie mentale dans un contexte universitaire. Comme expliqué dans le quatrième article, notre première tentative n'a pas abouti à des résultats significatifs. Le défi qui nous attend est d'accentuer la différence entre la condition contrôle et la condition imagerie tout en gardant un degré d'élaboration comparable entre les deux conditions, pour pouvoir attribuer une éventuelle différence entre les groupes spécifiquement à l'imagerie mentale. Une autre manipulation possible pourrait se faire au niveau des mises en situation pour un-e même participante. Nous pourrions manipuler la facilité avec laquelle une situation peut être imaginée, puis recueillir le score subjectif de vivacité d'imagerie. Si ce score prédit la probabilité de rappel ultérieur en contrôlant pour les variables parasites, comme il a déjà été fait dans le Chapitre 4 (e. g., temps de lecture, connaissances préalables), ceci pourrait être un indice fiable de l'utilité mnésique de l'imagerie dans ce contexte-là.

Il nous semble judicieux de continuer en parallèle à investiguer le rôle des simulations incarnées et du langage dans la mémoire des concepts abstraits dans des conditions expérimentales contrôlées, tout en continuant le travail entamé dans le deuxième article sur la distinctivité. Ainsi, pour déterminer le rôle des expériences d'une part, et des informations linguistiques d'autre part, une nouvelle expérience pourrait se baser sur un paradigme d'isolation à la manière de Guérard et Lagacé (2014). Nous pourrions, par exemple, manipuler la distinctivité émotionnelle (ou un autre élément expérientiel) en créant une liste de mots abstraits partageant des caractéristiques expérientielles communes (liste contrôle) et une autre liste construite de la même manière, à l'exception d'un mot (le mot isolé) qui serait particulièrement distinctif sur le plan émotionnel (liste avec isolement). Si le mot isolé est mieux mémorisé que le mot à la même position dans la liste contrôle, cela nous renseignerait

sur l'importance de l'ancrage émotionnel de la mémoire des concepts abstraits. Une manipulation similaire pourrait être menée avec un isolement exercé sur une dimension linguistique (e.g., le score distributionnel utilisé dans Liu et al., 2021). Cela nous permettrait de constater si le gain mnésique causé par la distinctivité expérientielle est plus grand que celui de la distinctivité linguistique.

Une méthode utilisant une interférence linguistique pourrait constituer un mode opératoire pertinent à explorer pour comprendre le poids des informations linguistiques dans la mémoire des concepts abstraits. Cette méthode reprendrait la procédure utilisée dans la seconde étude du troisième article sur les concepts abstraits, c'est-à-dire une tâche de mémoire à court-terme à exécuter en parallèle de la tâche de mémorisation. Cependant, au lieu de devoir mémoriser quatre formes géométriques, les participants devraient mémoriser quatre pseudo-mots, puis s'en voir présenter un cinquième, pour lequel ils devraient décider s'il rime avec l'un des quatre précédents.

Aussi, il nous semble pertinent de démontrer la chaîne hypothétique de processus sous-tendant l'effet de l'imagerie mentale pour les concepts abstraits. Lors de l'interprétation des résultats de la deuxième expérience du Chapitre 3, la supériorité de l'imagerie mentale en termes de performance de mémorisation des mots abstraits a pu être expliquée par le fait que l'imagerie active plus le contenu sémantique du concept abstrait, éléments qui sont plus accessibles à la récupération que ne le sont les éléments linguistiques activés par la condition contrôle. Il est supposé ici que ces éléments sémantiques sont surtout des expériences introspectives. Il faudrait donc montrer que le fait de faire de l'imagerie mentale (processus en apparence surtout visuel) augmente l'accessibilité à ces éléments sémantiques introspectifs et que l'accès à ces éléments augmente la probabilité de rappel, ce qui équivaut à une hypothèse de médiation par les expériences introspectives.

CONCLUSION

Les études que nous avons réalisées en référence à la cognition incarnée s'inscrivent dans l'étude du fonctionnement et de l'optimisation des processus de récupération mnésique ancrés dans des simulations perceptives, motrices et introspectives. Plus précisément, les études présentes dans cette thèse suggèrent que l'imagerie mentale est un moyen d'orienter explicitement un processus de mémorisation vers les aspects sensorimoteurs des items à apprendre. Comme la récupération repose sur des simulations sensorimotrices, les éléments sensorimoteurs sont des indices privilégiés pour cette récupération. Or, ces indices de récupération sont particulièrement accessibles dans un apprentissage avec de l'imagerie mentale, ce qui facilite alors la récupération d'une trace mnésique.

L'avantage mnésique porté par l'imagerie mentale existe autant du point de vue des mots concrets que des mots abstraits. Pour les concepts concrets, nous avons montré qu'en plus des éléments visuels, l'action était importante à intégrer dans l'activité d'imagerie, et ce, en adoptant une perspective mentale à la première personne. Nous avons pu constater que cet aspect moteur apportait d'autant plus de bénéfices s'il était imaginé dans une situation cohérente. L'imagerie mentale peut être aussi une stratégie intéressante pour mémoriser des mots abstraits. En effet, centrer sur les aspects expérientiels des concepts abstraits en imaginant des situations liées à ces derniers favorise leur mémorisation comparé à une stratégie plus orientée sur leurs aspects linguistiques. De surcroît, la perturbation de l'imagerie mentale sous des conditions d'interférence nous a permis d'estimer que notre condition d'imagerie mentale était effectivement plus orientée vers le contenu expérientiel des concepts que la condition linguistique. Cet effet positif de l'imagerie mentale est moins évident dès lors qu'il est testé en condition plus écologique, où il est plus complexe de gérer la complexité du matériel d'apprentissage et d'atteindre un niveau de contrôle semblable à celui des études expérimentales en laboratoire. Ce travail de thèse ouvre des pistes pour de futurs travaux consolidant les présentes découvertes.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- Albers, A. M., Kok, P., Toni, I., Dijkerman, H. C., & de Lange, F. P. (2013). Shared representations for working memory and mental imagery in early visual cortex. *Current Biology*, 23(15), 1427–1431. <https://10.1016/j.cub.2013.05.065>
- Amit, E., & Greene, J. D. (2012). You See, the Ends Don't Justify the Means: Visual Imagery and Moral Judgment. *Psychological Science*, 23(8), 861–868. <https://10.1177/0956797611434965>
- Anderson, J. A. (1973). A theory for the recognition of items from short memorized lists. *Psychological Review*, 80(6), 417–438. <https://doi.org/10.1037/h0035486>
- Andrews et al., 2014 Andrews, M., Frank, S., & Vigliocco, G. (2014). Reconciling Embodied and Distributional Accounts of Meaning in Language. *Topics in Cognitive Sciences*, 6(3), 359–370. <https://doi.org/10.1111/tops.12096>
- Arminjon, M., Preissmann, D., Chmetz, F., Duraku, A., Ansermet, F., & Magistretti, P. J. (2015). Embodied memory: Unconscious smiling modulates emotional evaluation of episodic memories. *Frontiers in Psychology*, 6, 650. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00650>
- Bagri, G. & Jones, G. V. (2018). The role of first person perspective and vivid imagery in memory for written narratives. *Educational Psychology in Practice*, 34(3), 229–244. [doi:10.1080/02667363.2018.1431522](https://doi.org/10.1080/02667363.2018.1431522)
- Barclay, J. R., Bransford, J. D., Franks, J. J., McCarrell, N. S., & Nitsch, K. (1974). Comprehension and semantic flexibility. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 13(4), 471–481. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(74\)80024-1](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(74)80024-1)
- Barlassina, L., & Gordon, R. M. (Summer 2017). *Folk Psychology as Mental Simulation*. <https://plato.stanford.edu/entries/folkpsych-simulation/#OrigVariST>
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577–660. <https://doi.org/10.1017/S0140525X99002149>
- Barsalou, L. W. (2007). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Barsalou, L. W. (2016). On Staying Grounded and Avoiding Quixotic Dead Ends. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 1122–1142. <https://10.3758/s13423-016-1028-3>

- Barsalou, L. W. (2020). Challenges and opportunities for grounding cognition. *Journal of Cognition*, 3(1). <https://doi.org/10.5334/joc.116>
- Barsalou, L. W., Dutriaux, L., & Scheepers, C. (2018). Moving beyond the distinction between concrete and abstract concepts. *Philosophical Transaction of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1752), 20170144. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0144>
- Barsalou, L. W., Santos, A., Simmons, W. K., & Wilson, C. D. (2008). Language and simulation in conceptual processing. *Symbols, embodiment, and meaning*, 245-283.
- Barsalou, L. W., Simmons, W. K., Barbey, A. K., & Wilson, C. D. (2003). Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *TRENDS in Cognitive Science*, 7(2), 84-91. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00029-3)
- Barsalou, L.W., & Wiemer-Hastings, K. (2005) Situating abstract concepts. In D. Pecher & R. A. Zwaan (Eds.), *Grounding cognition: The role of perception and action in memory, language, and thinking* (pp. 129-163). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511499968.007>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bates, K. E., Gilligan-Lee, K., & Farran, E. K. (2021). Reimagining Mathematics: The Role of Mental Imagery in Explaining Mathematical Calculation Skills in Childhood. *Mind, Brain, and Education*, 15(2), 189-198. <https://doi.org/10.1111/mbe.12281>
- Bedny, M., Koster-Hale, J., Elli, G., Yazzolino, L., & Saxe, R. (2019). There's more to "sparkle" than meets the eye: Knowledge of vision and light verbs among congenitally blind and sighted individuals. *Cognition*, 189, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.03.017>
- Besken, M., & Mulligan, N. W. (2022). The bizarreness effect and visual imagery: No impact of concurrent visuo-spatial distractor tasks indicates little role for visual imagery. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(9), 1281-1295. <https://doi.org/10.1037/xlm0001038>
- Binder, J. R., Westbury, C. F., McKiernan, K. A., Possing, E. T., & Medler, D. A. (2005). Distinct Brain Systems for Processing Concrete and Abstract Concepts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(6), 905-917. <https://doi.org/10.1162/0898929054021102>

- Blazhenkova, O. (2016). Vividness of object and spatial imagery. *Perceptual and Motor Skills, 122*(2), 490–508. <https://10.1177/0031512516639431>
- Bohler, S. (2019). *Cerveau & Psycho n°113 - Septembre 2019 - Cognition incarnée : quand le corps stimule la pensée*. <https://www.cerveauetpsycho.fr/sd/cognition/cerveau-psycho-n113-17307.php>
- Bonin, P., Méot, A., & Bugaiska, A. (2018). Concreteness norms for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and word recognition times. *Behavior Research Methods, 50*(6), 2366–2387. <https://10.3758/s13428-018-1014-y>
- Bonin, P., Méot, A., Aubert, L.-F., Malardier, N., Niedenthal, P. M., & Capelle-Toczek, M.-C. (2003). Concreteness, imageability, subjective frequency and emotionality ratings for 866 words. *L'Année Psychologique, 103*(4), 655–694. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29658>
- Bonin, P., Méot, A., Ferrand, L., & Bugaiska, A. (2015). Sensory experience ratings (SERs) for 1,659 French words: Relationships with other psycholinguistic variables and visual word recognition. *Behavior Research Methods, 47*(3), 813–825. <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0503-x>
- Borghi, A. M., Binkofski, F., Castelfranchi, C., Cimatti, F., Scorolli, C., & Tummolini, L. (2017). The challenge of abstract concepts. *Psychological Bulletin, 143*(3), 263–292. <https://doi.org/10.1037/bul0000089>
- Borst, G., & Kosslyn, S. M. (2008). Visual mental imagery and visual perception: Structural equivalence revealed by scanning processes. *Memory & Cognition, 36*(4), 849–862. <https://10.3758/MC.36.4.849>
- Bottini, R., Morucci, P., D'Urso, A., Collignon, O., & Crepaldi, D. (2022). The concreteness advantage in lexical decision does not depend on perceptual simulations. *Journal of Experimental Psychology: General, 151*(3), 731–738. <https://doi.org/10.1037/xge0001090>
- Bower, G. H. (1970). Analysis of a mnemonic device: Modern psychology uncovers the powerful components of an ancient system for improving memory. *American Scientist, 58*(5), 496–510. <https://www.jstor.org/stable/27829239>
- Bower, G. H. (1972). Mental imagery and associative learning. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory* (pp. 51–88). John Wiley & Sons
- Brodeur, M. B., Kehayia, E., Dion-Lessard, G., Chauret, M., Montreuil, T., Dionne-Dostie, E., & Lepage, M. (2012). The bank of standardized stimuli (BOSS): Comparison between French

- and English norms. *Behavior Research Methods*, 44(4), 961–970. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0184-7>
- Brouillet, D., Brouillet, T., Milhau, A., Heurley, L., Vagnot, C., & Brunel, L. (2016). Word-to-picture recognition is a function of motor components mappings at the stage of retrieval. *International Journal of Psychology*, 51(5), 397–402. <https://doi.org/10.1002/ijop.12210>
- Brown, V. A. (2021). An Introduction to Linear Mixed-Effects Modeling in R. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 4(1), 2515245920960351. <https://doi.org/10.1177/2515245920960351>
- Brunel, L., Goldstone, R. L., Vallet, G., Riou, B., & Versace, R. (2013). When seeing a dog activates the bark: multisensory generalization and distinctiveness effects. *Experimental Psychology*, 23047916. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23047916>
- Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M., & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory: Sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1081–1088. <https://doi.org/10.1037/a0015537>
- Brunel, L., Lesourd, M., Labeye, E., & Versace, R. (2010). The sensory nature of knowledge: Sensory priming effects in semantic categorization. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(5), 955–964. <https://doi.org/10.1080/17470210903134369>
- Brysbaert, M., & Stevens, M. (2018). Power Analysis and Effect Size in Mixed Effects Models: A Tutorial. *Journal of Cognition*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/joc.10>
- Buckner, R. L., & Wheeler, M. E. (2001). The cognitive neuroscience of remembering. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 624–634. <https://doi.org/10.1038/35090048>
- Campos, A. (2014). Gender differences in imagery. *Personality Individual Differences*, 59, 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2013.12.010>
- Clark, A. (2001). *Mindware : An introduction to the philosophy of cognitive science*. New York : Oxford University Press.
- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82(6), 407–428. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.82.6.407>
- Conca, F., Borsa, V. M., Cappa, S. F., & Catricalà, E. (2021). The multidimensionality of abstract concepts: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 127, 474–491. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.05.004>

- Connell, L., & Lynott, D. (2012). Strength of perceptual experience predicts word processing performance better than concreteness or imageability. *Cognition*, *125*(3), 452–465. <https://10.1016/j.cognition.2012.07.010>
- Connell, L., & Lynott, D. (2014). Principles of Representation: Why You Can't Represent the Same Concept Twice. *Topics in Cognitive Sciences*, *6*(3), 390–406. <https://doi.org/10.1111/tops.12097>
- Connell, L., Lynott, D., & Banks, B. (2018). Interoception: the forgotten modality in perceptual grounding of abstract and concrete concepts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *373*(1752), 20170143. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0143>
- Craik, F. I. M., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *104*(3), 268–294. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.104.3.268>
- Croijmans, I., Speed, L. J., Arshamian, A., & Majid, A. (2020). Expertise Shapes Multimodal Imagery for Wine. *Cognitive Science*, *44*(5), e12842. <https://10.1111/cogs.12842>
- Cumming, J., & Williams, S. E. (2012). The role of imagery in performance. In S. M. Murphy (Ed.), *The Oxford handbook of sport and performance psychology* (pp. 213–232). Oxford University Press. <https://doi.org/10.13140/2.1.3274.5925>
- Damasio, A. R. (1989). The Brain Binds Entities and Events by Multiregional Activation from Convergence Zones. *Neural Computation*, *1*(1), 123–132. <https://10.1162/neco.1989.1.1.123>
- Damasio, A., R. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *351*(1346), 1413–1420. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0125>
- Danker, J. F., & Anderson, J. R. (2010). The ghosts of brain states past: Remembering reactivates the brain regions engaged during encoding. *Psychological Bulletin*, *136*(1), 87–102. <https://doi.org/10.1037/a0017937>
- Davis, C. P., Joergensen, G. H., Boddy, P., Dowling, C., & Yee, E. (2020). Making It Harder to "See" Meaning: The More You See Something, the More Its Conceptual Representation Is Susceptible to Visual Interference. *Psychological Science*, *32*339068. <https://10.1177/0956797620910748>

- Dawes, A. J., Keogh, R., Andrillon, T., & Pearson, J. (2020). A cognitive profile of multi-sensory imagery, memory and dreaming in aphantasia. *Scientific Reports*, *10*(10022), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65705-7>
- Del Maschio, N., Fedeli, D., Garofalo, G., & Buccino, G. (2021). Evidence for the Concreteness of Abstract Language: A Meta-Analysis of Neuroimaging Studies. *Brain Sciences*, *12*(1), 32. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010032>
- Delogu, F., Palmiero, M., Federici, S., Plaisant, C., Zhao, H., & Belardinelli, O. (2010). Non-visual exploration of geographic maps: Does sonification help? *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, *5*(3), 164–174. <https://doi.org/10.3109/17483100903100277>
- Desai, R. H., Reilly, M., & van Dam, W. (2018). The multifaceted abstract brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *373*(1752), 20170122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0122>
- Di Nuovo, A., & Cangelosi, A. (2021). Abstract Concept Learning in Cognitive Robots. *Current Robotics Reports*, *2*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00038-x>
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., and Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events, a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, *91*, 176–180. <https://doi.org/10.1007/BF00230027>.
- Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, *102*(1), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009>
- Dijkstra, N., Ambrogioni, L., Vidaurre, D., & van Gerven, M. (2020). Neural dynamics of perceptual inference and its reversal during imagery. *eLife*. <https://doi.org/10.7554/eLife.53588>
- Dijkstra, N., Hinne, M., Bosch, S. E., & van Gerven, M. A. J. (2019). Between-subject variability in the influence of mental imagery on conscious perception. *Scientific Reports*, *9*(15658), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52072-1>
- Dove, G. (2014). Thinking in words: Language as an embodied medium of thought. *Topics in Cognitive Sciences*, *6*, 371–389. <https://doi.org/10.1111/tops.12102>
- Downing-Doucet, F., & Guérard, K. (2014). A motor similarity effect in object memory. *Psychonomic Bulletin Review*, *21*(4), 1033–1040. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0570-5>

- Driskell, J. E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, 79(4), 481–492. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.79.4.481>
- Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016). Learning is better with the hands free: The role of posture in the memory of manipulable objects. *PLOS ONE*, 11(7), e0159108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159108>
- Edmiston, P., & Lupyan, G. (2017). Visual interference disrupts visual knowledge. *Journal of Memory and Language*, 92, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2016.07.002>
- Engelkamp, J. (1995). Visual imagery and enactment of actions in memory. *British Journal of Psychology*, 86(2), 227–240. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1995.tb02558.x>
- Engelkamp, J., Seiler, K. H., & Zimmer, H. D. (2004). Memory for actions: Item and relational information in categorized lists. *Psychological Research*, 69(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00426-003-0160-7>
- Eysenck, M. W. (1976). Arousal, learning, and memory. *Psychological Bulletin*, 83(3), 389–404. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.83.3.389>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41, 1149–1160.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39, 175–191
- Fingerhut, J., & Prinz, J. J. (2018). Grounding evaluative concepts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373(1752), 20170142. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0142>
- Fodor, J. A. (1975). *The Language of Thought*. New York: Thomas Crowell.
- Foglia, L., & O'Regan, J. K. (2016). A new imagery debate: enactive and sensorimotor accounts. *Review of Philosophy and Psychology*, 7(1), 181–196. <https://doi.org/10.1007/s13164-015-0269-9>
- Foley, M. A. (2012). Imagery encoding and false recognition errors: Exploring boundary conditions of imagery's enhancing effects. *Memory*, 20(7), 700–716. <https://doi.org/10.1080/09658211.2012.697172>

- Foley, M. A., Hughes, K., Librot, H., & Paysnick, A. (2009). Imagery encoding effects on memory in the DRM paradigm: A test of competing predictions. *Applied Cognitive Psychology, 23*(6), 828–848. <https://doi.org/10.1002/acp.1516>
- Foley, M. A., Wozniak, K. H., & Gillum, A. (2006). Imagination and false memory inductions: Investigating the role of process, content and source of imaginations. *Applied Cognitive Psychology, 20*(9), 1119–1141. <https://doi.org/10.1002/acp.1265>
- Fougnie, D., & Marois, R. (2009). Dual-task interference in visual working memory: A limitation in storage capacity but not in encoding or retrieval. *Attention, Perception, & Psychophysics, 71*(8), 1831-1841. <https://doi.org/10.3758/APP.71.8.1831>
- Francis, A. L. (2018). The embodied theory of stress: A constructionist perspective on the experience of stress. *Review of General Psychology, 22*(4), 398–405. <https://doi.org/10.1037/gpr0000164>
- Fulford, J., Milton, F., Salas, D., Smith, A., Simler, A., Winlove, C., & Zeman, A. (2018). The neural correlates of visual imagery vividness – An fMRI study and literature review. *Cortex, 105*, 26–40. <https://10.1016/j.cortex.2017.09.014>
- Gallagher, S., & Bower, M. (2014). Making enactivism even more embodied. *AVANT. The Journal of the Philosophical-Interdisciplinary Vanguard, 2*, 232-247
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences, 4*(1), 23–48. <https://doi.org/10.1007/s11097-005-4737-z>
- Gallese, V., & Sinigaglia, C. (2011). What is so special about embodied simulation? *Trends in cognitive sciences, 15*(11), 512-519. doi:10.1016/j.tics.2011.09.003
- Garagnani, M., Kirilina, E., & Pulvermüller, F. (2021). Semantic Grounding of Novel Spoken Words in the Primary Visual Cortex. *Frontiers in Human Neuroscience, 15*, 581847. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.581847>
- Gatti, D., Vecchi, T., & Mazzoni, G. (2021). Cerebellum and semantic memory: A TMS study using the DRM paradigm. *Cortex, 135*, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.11.017>
- Ghio, M., Vaghi, M. M. S., Perani, D., & Tettamanti, M. (2016). Decoding the neural representation of fine-grained conceptual categories. *Neuroimage, 132*, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.009>

- Glaze, J. A. (1928). The association value of non-sense syllables. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 35, 255–269. <https://doi.org/10.1080/08856559.1928.10532156>
- Gleitman, L. (1990). The structural sources of verb meanings. *Language Acquisition*, 1, 3–55. https://doi.org/10.1207/s15327817la0101_2
- Glenberg, A. (1997). What memory is for. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(1), 1-55
- Glenberg, A. M. (2017). How reading comprehension is embodied and why that matters. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 4(1), 5–18. <https://iejee.com/index.php/IEJEE/article/view/210>
- Glenberg, A. M. (2022). Embodiment and learning of abstract concepts (such as algebraic topology and regression to the mean). *Psychological Research*, 86(8), 2398–2398. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01576-5>
- Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S., & Kaschak, M. P. (2004). Activity and Imagined Activity Can Enhance Young Children's Reading Comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 96(3), 424–436. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.424>
- Glisky, M. L., Williams, J. M., & Kihlstrom, J. F. (1996). Internal and external mental imagery perspectives and performance on two tasks. *Journal of Sport Behavior*, 19(1), 3. <https://www.questia.com/library/journal/1G1-20825967/internal-and-external-mental-imagery-perspectives>
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology*, 66(3), 325–331. <https://10.1111/j.2044-8295.1975.tb01468.x>
- Guérard, K., & Lagacé, S. (2014). A motor isolation effect: When object manipulability modulates recall performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(12), 2439–2454. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.932399>
- Guérard, K., Guerrette, M.-C., & Rowe, V. P. (2015). The role of motor affordances in immediate and long-term retention of objects. *Acta Psychologica*, 162, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.10.008>
- Guillot, A., & Collet, C. (2005). Duration of mentally simulated movement: A review. *Journal of Motor Behavior*, 37(1), 10–20. <https://10.3200/JMBR.37.1.10-20>

- Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2009). Brain activity during visual versus kinaesthetic imagery: An fMRI study. *Human Brain Mapping, 30*, 2157–2172. <https://doi.org/10.1002/hbm.20658>
- Gupton, T., & Frincke, G. (1970). Imagery, mediational instructions, and noun position in free recall of noun-verb pairs. *Journal of Experimental Psychology: General, 86*(3), 461–462. <https://doi.org/10.1037/h0030178>
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D, 42*(1), 335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
- Harpaintner, M., Trumpp, N. M., & Kiefer, M. (2018). The Semantic Content of Abstract Concepts: A Property Listing Study of 296 Abstract Words. *Frontiers in Psychology, 9*, 412259. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01748>
- Harris, C. R., & Pashler, H. (2005). Enhanced memory for negatively emotionally charged pictures without selective rumination. *Emotion, 5*(2), 191–199. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.5.2.191>
- Harrison, S. A., & Tong, F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. *Nature, 458*(7238), 632–635. <https://doi.org/10.1038/nature07832>
- Hathout, N., Sajous, F., & Calderone, B. (2014). GLÀFF, a large versatile French lexicon. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'14)* (pp. 1007-1012).
- Hesslow, G. (2012). The current status of the simulation theory of cognition. *Brain Research, 1428*, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.026>
- Holmes, P. S., & Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology, 13*(1), 60–83. <https://doi.org/10.1080/10413200109339004>
- Horchak & Garrido (2022) Horchak, O. V., & Garrido, M. V. (2022). Simulating background settings during spoken and written sentence comprehension. *Psychonomic Bulletin & Review, 29*(4), 1426–1439. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02061-9>
- Horchak, O. V., & Garrido, M. V. (2022). Simulating background settings during spoken and written sentence comprehension. *Psychonomic Bulletin & Review, 29*(4), 1426–1439. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02061-9>

- Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. *Science*, *340*(6132), 639–642. <https://doi.org/10.1126/science.1234330>
- Iani, F. (2019). Embodied memories: Reviewing the role of the body in memory processes. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(6), 1747–1766. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01674-x>
- Iani, F., Schaeken, W., Ras, I. N., & Bucciarelli, M. (2023). Motor imagery and engagement favour spatial reasoning. *Mem. Cognit.*, *51*(5), 1103–1114. <https://doi.org/10.3758/s13421-022-01383-2>
- James, W. (1890). *Principles of psychology. Vol. 1*. New York: Holt
- Juhasz, B. J., & Yap, M. J. (2013). Sensory experience ratings for over 5,000 mono- and disyllabic words. *Behavior Research Methods*, *45*(1), 160–168. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0242-9>
- Kelly, J. (2023, 25 février). Can ChatGPT solve the Winograd Schema challenge ? - James Kelly - Medium. Medium. <https://medium.com/@mrkellyjam/can-chatgpt-solve-the-winograd-schema-challenge-605bb6e3af79>
- Kemp, C., & Tenenbaum, J. B. (2008). The discovery of structural form. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(31), 10687–10692. <https://doi.org/10.1073/pnas.0802631105>
- Kensinger, E. A. (2009). Remembering the details: Effects of emotion. *Emotion Review*, *1*(2), 99–113. <https://doi.org/10.1177/1754073908100432>
- Keogh, R., & Pearson, J. (2018). The blind mind: No sensory visual imagery in aphantasia. *Cortex*, *105*, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.10.012>
- Kilner, J. M., & Lemon, R. N. (2013). What we know currently about mirror neurons. *Current biology*, *23*(23). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.051>
- Kim, J. S., Elli, G. V., & Bedny, M. (2019). Knowledge of animal appearance among sighted and blind adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(23), 11213–11222. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900952116>
- Kinder, K. T., & Buss, A. T. (2021). The effect of motor engagement on memory: Testing a motor-induced encoding account. *Memory & Cognition*, *49*(3), 586–599. <https://doi.org/10.3758/s13421-020-01113-6>

- Kizach, J. (2014). Analyzing Likert-scale data with mixed-effects linear models: a simulation study. Poster Presented at Linguistic Evidence. <https://pure.au.dk/portal/files/70360382/simulationposterjk.pdf>
- Kobayashi, M. et al. (2004). Functional imaging of gustatory perception and imagery: “top-down” processing of gustatory signals. *Neuroimage* 23, 1271–1282. <https://10.1016/j.neuroimage.2004.08.002>
- Koenig, M. A., & Woodward, A. L. (2012). Word learning. In *Oxford University Press eBooks* (pp. 617-626). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198568971.013.0037>
- Kok, P., Failing, M. F., & de Lange, F. P. (2014). Prior Expectations Evoke Stimulus Templates in the Primary Visual Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(7), 1546–1554. https://10.1162/jocn_a_00562
- Kosslyn, S. M., & Thompson, W. L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychological Bulletin*, 129(5), 723–746. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.129.5.723>
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4(1), 47–60. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.4.1.47>
- Kousta, S.-T., Vigliocco, G., Vinson, D. P., Andrews, M., & Del Campo, E. (2011). The representation of abstract words: Why emotion matters. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(1), 14–34. <https://doi.org/10.1037/a0021446>
- Kumle, L., Võ, M. L., & Draschkow, D. (2021). Estimating power in (generalized) linear mixed models: an open introduction and tutorial in R. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2528–2543. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01546-0>
- Labeye, E., & Versace, R. (2007). Activation an integration of sensory component. In J. Grainger, F. X. Alario, B. Burle, & N. Janssen (Eds.), XVth Conference of the European society for cognitive psychology (ESCOP), Marseille, August 29th–September 1st.
- Labeye, E., Oker, A., Badard, G., & Versace, R. (2008). Activation and integration of motor components in a short-term priming paradigm. *Acta Psychologica*, 129(1), 108–111. <https://10.1016/j.actpsy.2008.04.010>

- Laeng, B., Bloem, I. M., D'Ascenzo, S., & Tommasi, L. (2014). Scrutinizing visual images: The role of gaze in mental imagery and memory. *Cognition*, *131*(2), 263–283. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.01.003>
- Lakhzoum, D., Izaute, M., & Ferrand, L. (2021). Semantic similarity and associated abstractness norms for 630 French word pairs. *Behavior Research Methods*, *53*(3), 1166–1178. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01488-z>
- Landy, D., Allen, C., & Zednik, C. (2014). A perceptual account of symbolic reasoning. *Front. Psychol.*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00275>
- Lau, M. C., Goh, W. D., & Yap, M. J. (2018). An item-level analysis of lexical-semantic effects in free recall and recognition memory using the megastudy approach. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(10), 2207–2222. <https://doi.org/10.1177/1747021817739834>
- Lebon, F., Rouffet, D., Collet, C., & Guillot, A. (2008). Modulation of EMG power spectrum frequency during motor imagery. *Neuroscience Letters*, *435*(3), 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.02.033>
- Lenhart, R. E., & Schwartz, S. M. (1983). Tactile perception and the right hemisphere: A masculine superiority for imagery coding. *Brain and Cognition*, *2*, 224–232. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(83\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0278-2626(83)90011-8)
- Lenth, R. (2023). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.8.6, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Levesque, Hector, Ernest Davis, and Leora Morgenstern. "The winograd schema challenge." Thirteenth international conference on the principles of knowledge representation and reasoning. 2012. <https://cdn.aaai.org/ocs/4492/4492-21843-1-PB.pdf>
- Levine, L. J., & Edelman, R. S. (2009). Emotion and memory narrowing: A review and goal-relevance approach. *Cognition and Emotion*, *23*(5), 833–875. <https://doi.org/10.1080/02699930902738863>
- Liu, P. Q., Connell, L., & Lynott, D. (2021). Can illness be bright? Metaphor comprehension depends on linguistic and embodied factors. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/qd4fa>
- Lo, S., & Andrews, S. (2015). To transform or not to transform: using generalized linear mixed models to analyse reaction time data. *Frontiers in Psychology*, *6*, 148545. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01171>

- Lorayne, H., & Lucas, J. The memory book. *New York: Stein & Day*, 1974
- Lorey, B., Bischoff, M., Pilgramm, S., Stark, R., Munzert, J., & Zentgraf, K. (2009). The embodied nature of motor imagery: The influence of posture and perspective. *Experimental Brain Research*, *194*(2), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1693-1>
- Louwerse, M. M. (2018). Knowing the Meaning of a Word by the Linguistic and Perceptual Company It Keeps. *Topics in Cognitive Sciences*, *10*(3), 573–589. <https://doi.org/10.1111/tops.12349>
- Lund, K., & Burgess, C. (1996). Producing high-dimensional semantic spaces from lexical co-occurrence. *Behavior research methods, instruments, & computers*, *28*(2), 203–208. <https://doi.org/10.3758/BF03204766>
- Lupyan, G & Clark, A. (2015). Words and the World: Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. *Current Directions in Psychological Science*, *24*(4), 279–284. <https://doi.org/10.1177/0963721415570732>
- Lupyan, G., & Ward, E. J. (2013). Language can boost otherwise unseen objects into visual awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(35), 14196–14201. <https://doi.org/10.1073/pnas.1303312110>
- Macedonia, M., Lehner, A. E., & Repetto, C. (2020). Positive effects of grasping virtual objects on memory for novel words in a second language. *Science Reports*, *10*(10760), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67539-9>
- MacLeod, C. M., Gopie, N., Hourihan, K. L., Neary, K. R., & Ozubko, J. D. (2010). The production effect: Delineation of a phenomenon. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 671– 685. <https://doi.org/10.1037/a0018785>
- Mahon, B. Z. (2015). What is embodied about cognition? *Language, Cognition and Neuroscience*, *30*(4), 420–429. <https://doi.org/10.1080/23273798.2014.987791>
- Makowski, D. (2018). The psycho Package: an Efficient and Publishing-Oriented Workflow for Psychological Science. *Journal of Open Source Software*, *3*(22), 470. <https://doi.org/10.21105/joss.00470>
- Malinverni, L., & Pares, N. (2014). Learning of Abstract Concepts through Full-Body Interaction: A Systematic Review. *Review Articles in Educational Technology*, *17*(4). <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.100>

- Maraver, M. J., Lapa, A., Garcia-Marques, L., Carneiro, P., & Raposo, A. (2021). Imagination reduces false memories for everyday action sentences: Evidence from pragmatic inferences. *Frontiers in Psychology, 12*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.668899>
- Marmurek, H. H. C., & Hamilton, M. E. (2000). Imagery effects in false recall and false recognition. *Journal of Mental Imagery, 24*(1–2), 83–96.
- Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (2021). Embodied mental imagery improves memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 74*(8), 1396–1405. <https://doi.org/10.1177/17470218211009227>
- Marre, Q., Huet, N., & Labeye, E. (2020) Les effets de l'imagerie mentale sur la mémoire : un continuum d'incarnation des stratégies de mémorisation, HECO: Human Embodied Cognition, Montpellier (France), 8-9 octobre 2020
- Mather, M., & Sutherland, M. (2009). Disentangling the effects of arousal and valence on memory for intrinsic details. *Emotion Review, 1*(2), 118–119. doi:10.1177/1754073908100435
- Mathias, B., Andrä, C., Schwager, A., Macedonia, M., & von Kriegstein, K. (2022). Twelve- and Fourteen-Year-Old School Children Differentially Benefit from Sensorimotor- and Multisensory-Enriched Vocabulary Training. *Educ. Psychol. Rev., 34*(3), 1739–1770. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09648-z>
- McCauley, M. E., Eskes, G., & Moscovitch, M. (1996). The effect of imagery on explicit and implicit tests of memory in young and old people: A double dissociation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale, 50*(1), 34–41. <https://doi.org/10.1037/1196-1961.50.1.34>
- McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (1986). Bizarre imagery as an effective memory aid: The importance of distinctiveness. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 12*(1), 54–65. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.12.1.54>
- Metzger, R. L., & Antes, J. R. (1976). Sex and coding strategy effects on reaction time to hemispheric probes. *Memory and Cognition, 4*, 167-171. <https://10.3758/BF03213160>
- Meyer, K., & Damasio, A. (2009). Convergence and divergence in a neural architecture for recognition and memory. *Trends in Neurosciences, 32*(7), 376–382. <https://10.1016/j.tins.2009.04.002>
- Mickley Steinmetz, K. R., Addis, D. R., & Kensinger, E. A. (2010). The effect of arousal on the emotional memory network depends on valence. *NeuroImage, 53*(1), 318–324. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.06.015

- Moulton, S. T., & Kosslyn, S. M. (2009). Imagining predictions: mental imagery as mental emulation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364(1521), 1273–1280. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0314>
- Mueller, J. H., & Jablonski, E. M. (1970). Instructions, noun imagery, and priority in free recall. *Psychological Reports*, 27(2), 559–566. <https://doi.org/10.2466/pro.1970.27.2.559>
- Niedenthal, P. M. (2007). Embodying Emotion. *Science*, 316(5827), 1002–1005. <https://doi.org/10.1126/science.1136930>
- Noble, C. E. (1952). An analysis of meaning. *Psychological Review*, 59(6), 421–430. <https://doi.org/10.1037/h0054087>
- Noble, C. E., & McNeely, D. A. (1957). The role of meaningfulness (m) in paired-associate verbal learning. *Journal of Experimental Psychology*, 53(1), 16–22. <https://doi.org/10.1037/h0041215>
- Oliver, M. C., Bays, R. B., & Zabrocky, K. M. (2016). False memories and the DRM paradigm: Effect of imagery, list, and test type. *The Journal of General Psychology*, 143(1), 33–48. <https://doi.org/10.1080/00221309.2015.1110558>
- Onishi, S., Tobita, K., & Makioka, S. (2022). Hand constraint reduces brain activity and affects the speed of verbal responses on semantic tasks. *Scientific Reports*, 12(13545), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17702-1>
- OpenAI. (2023). ChatGPT (version 3.5) [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>
- Ostarek, M., & Bottini, R. (2021). Towards Strong Inference in Research on Embodiment – Possibilities and Limitations of Causal Paradigms. *Journal of Cognition*, 4(1). <https://10.5334/joc.139>
- Ostarek, M., & Huettig, F. (2017). A task-dependent causal role for low-level visual processes in spoken word comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(8), 1215–1224. <https://doi.org/10.1037/xlm0000375>
- Paivio, A. (1965). Abstractness, imagery, and meaningfulness in paired-associate learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4(1), 32–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(65\)80064-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(65)80064-0)
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, 76(3), 241–263. <https://doi.org/10.1037/h0027272>

- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Paivio, A., Rogers, T. B., & Smythe, P. C. (1968). Why are pictures easier to recall than words? *Psychonomic Science*, *11*(4), 137–138. <https://doi.org/10.3758/BF03331011>
- Palmiero, M., Piccardi, L., Giancola, M., Nori, R., D'Amico, S., & Olivetti Belardinelli, M. (2019). The format of mental imagery: from a critical review to an integrated embodied representation approach. *Cognitive Processing*, *20*(3), 277–289. <https://doi.org/10.1007/s10339-019-00908-z>
- Pearson, J. (2019). The human imagination: The cognitive neuroscience of visual mental imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(10), 624–634. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0202-9>
- Pearson, J., Rademaker, R. L., & Tong, F. (2011). Evaluating the Mind's Eye: The Metacognition of Visual Imagery. *Psychological Science*, *22*(12), 1535–1542. <https://doi.org/10.1177/0956797611417134>
- Perfors, A., Tenenbaum, J. B., & Regier, T. (2011). The learnability of abstract syntactic principles. *Cognition*, *118*(3), 306–338. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.11.001>
- Pexman, P. M., Muraki, E., Sidhu, D. M., Siakaluk, P. D., & Yap, M. J. (2019). Quantifying sensorimotor experience: Body–object interaction ratings for more than 9,000 English words. *Behavior Research Methods*, *51*(2), 453–466. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1171-z>
- Pezzulo, G., Barca, L., Bocconi, A. L., & Borghi, A. M. (2010). When affordances climb into your mind: Advantages of motor simulation in a memory task performed by novice and expert rock climbers. *Brain and Cognition*, *73*(1), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.03.002>
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: A virtual reality study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(5), 895–909. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.722657>
- Popham, S. F., Huth, A. G., Bilenko, N. Y., Deniz, F., Gao, J. S., Nunez-Elizalde, A. O., & Gallant, J. L. (2021). Visual and linguistic semantic representations are aligned at the border of human visual cortex. *Nature neuroscience*, *24*(11), 1628–1636. <https://doi.org/10.1038/s41593-021-00921-6>
- Postle, B. R., D'Esposito, M., & Corkin, S. (2005). Effects of verbal and nonverbal interference on spatial and object visual working memory. *Memory & Cognition*, *33*(2), 203–212. <https://doi.org/10.3758/BF03195309>

- Pressley, M., & Brewster, M. E. (1990). Imaginal elaboration of illustrations to facilitate fact learning: Creating memories of Prince Edward Island. *Applied Cognitive Psychology*, 4(5), 359–369. <https://doi.org/10.1002/acp.2350040502>
- Prinz, J. J. (2002). *Furnishing the mind: Concepts and their perceptual basis*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Prinz, J. J. (2012). *Beyond human nature. How culture and experience shape our lives*. London, United Kingdom: Penguin.
- Pylyshyn, Z. (1981). The imagery debate: analogue media versus tacit knowledge. *Psychological Review*, 88(1), 16-45. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.1.16>
- Pylyshyn, Z. (1999). Is vision continuous with cognition? The case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioral and Brain Sciences* 22, 341–423.
- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80(1), 1–24. <https://doi.org/10.1037/h0034650>
- Quillian, M. R. (1967). Word concepts: A theory and simulation of some basic semantic capabilities. *Behavioral Sciences*, 12(5), 410–430. <https://10.1002/bs.3830120511>
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Reggin, L. D., Muraki, E. J., & Pexman, P. M. (2021). Development of Abstract Word Knowledge. *Frontiers in Psychology*, 12, 686478. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.686478>
- Reilly, J., Peelle, J. E., Garcia, A., & Crutch, S. J. (2016). Linking somatic and symbolic representation in semantic memory: the dynamic multilevel reactivation framework. *Psychonomic bulletin & review*, 23(4), 1002–1014. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0824-5>
- Reisberg, D., Pearson, D. G., & Kosslyn, S. M. (2003). Intuitions and introspections about imagery: the role of imagery experience in shaping an investigator's theoretical views. *Applied Cognitive Psychology*, 17(2), 147–160. <https://doi.org/10.1002/acp.858>
- Repetto, C., Mathias, B., Weichselbaum, O., & Macedonia, M. (2021). Visual recognition of words learned with gestures induces motor resonance in the forearm muscles. *Scientific Reports*, 11(17278), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96792-9>

- Ricciardi, E., Menicagli, D., Leo, A., Costantini, M., Pietrini, P., & Sinigaglia, C. (2017). Peripersonal space representation develops independently from visual experience. *Scientific Reports*, 7(17673), 1–10. <https://10.1038/s41598-017-17896-9>
- Richardson, J. T. E. (1995). Gender differences in the Vividness of Visual Imagery Questionnaire: A meta-analysis. *Journal of Mental Imagery*, 19(3-4), 177–187
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., & Bringer, J. (2008). Movement imagery ability: Development and assessment of a revised version of the Vividness of Movement Imagery Questionnaire. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 30(2), 200–221. doi:10.1123/jsep.30.2.200
- Robin, F., & Mahé, A. (2015). Effects of image and verbal generation on false memory. *Imagination Cognition and Personality*, 35(1), 26–46. <https://doi.org/10.1177/0276236615574488>
- Roediger, H. L. (1980). The effectiveness of four mnemonics in ordering recall. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(5), 558–567. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.6.5.558>
- Rogers, T. B. (1977). Self-reference in memory: Recognition of personality items. *Journal of Research in Personality*, 11(3), 295–305. [https://10.1016/0092-6566\(77\)90038-1](https://10.1016/0092-6566(77)90038-1)
- Runge, M., Bakhilau, V., Omer, F., & D'Angiulli, A. (2015). Trial-by-Trial Vividness Self-Reports Versus VVIQ: A Meta-Analytic Comparison of Behavioral, Cognitive and Neurological Correlations. *Imagination, Cognition and Personality*, 35(2), 137–165. <https://doi.org/10.1177/0276236615587490>
- Sajous, F., Hathout, N., & Calderone, B. (n.d.). GlàffOLI [browser]. <http://redac.univ-tlse2.fr/glaffoli/search/index.jsp>
- Santarpia, A., Blanchet, A., Poinot, R., Lambert, J.-F., Mininni, G., & Thizon-Vidal, S. (2008). Evaluating the vividness of mental imagery in different French samples. *Pratiques Psychologiques*, 14(3), 421–441. <https://doi.org/10.1016/j.prps.2007.11.001>
- Saysani, A., Corballis, M. C., & Corballis, P. M. (2018). Colour envisioned: Concepts of colour in the blind and sighted. *Visual Cognition*, 26(5), 382–392. [HTTPS://https://doi.org/10.1080/13506285.2018.1465148](https://doi.org/10.1080/13506285.2018.1465148)
- Schacter, D. L., Addis, D. R., & Buckner, R. L. (2007). Remembering the past to imagine the future: the prospective brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(9), 657–661. <https://10.1038/nrn2213>

- Schendan, H. E., & Ganis, G. (2012). Electrophysiological Potentials Reveal Cortical Mechanisms for Mental Imagery, Mental Simulation, and Grounded (Embodied) Cognition. *Frontiers in Psychology, 3*, 29258. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00329>
- Schmidt, M., Benzing, V., Wallman-Jones, A., Mavilidi, M.-F., Lubans, D. R., & Paas, F. (2019). Embodied learning in the classroom: Effects on primary school children's attention and foreign language vocabulary learning. *Psychology of Sport and Exercise, 43*, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.12.017>
- Schwanenflugel, P. J., & Stowe, R. W. (1989). Context availability and the processing of abstract and concrete words in sentences. *Reading Research Quarterly, 24*(1), 114–126. <https://doi.org/10.2307/748013>
- Schwoebel, J., Friedman, R., Duda, N., & Coslett, H. B. (2001). Pain and the body schema : Evidence for peripheral effects on mental representations of movement. *Brain, 124*(10), 2098–2104. <https://doi.org/10.1093/brain/124.10.2098>
- Searle, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences, 3*(3), 417–424. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00005756>
- Senkfor, A. J., Van Petten, C., & Kutas, M. (2002). Episodic action for real objects: An ERP investigation with perform, watch, and imagine action encoding tasks versus a non-action encoding task. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(3), 402–419. <https://doi.org/10.1162/089892902317361921>
- Serences, J. T., Ester, E. F., Vogel, E. K., & Awh, E. (2009). Stimulus-specific delay activity in human primary visual cortex. *Psychological Science, 20*(2), 207–214. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02276.x>
- Sharot, T., Phelps, E.A. How arousal modulates memory: Disentangling the effects of attention and retention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience 4*, 294–306 (2004). <https://doi.org/10.3758/CABN.4.3.294>
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science, 171*(3972), 701–703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Siakaluk, P. D., Pexman, P. M., Aguilera, L., Owen, W. J., & Sears, C. R. (2008). Evidence for the activation of sensorimotor information during visual word recognition: The body–object interaction effect. *Cognition, 106*(1), 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.12.011>

- Siakaluk, P. D., Pexman, P. M., Sears, C. R., Wilson, K., Locheed, K., & Owen, W. J. (2008). The Benefits of Sensorimotor Knowledge: Body–Object Interaction Facilitates Semantic Processing. *Cognitive Science*, *32*(3), 591–605. <https://10.1080/03640210802035399>
- Sidhu, D., Kwan, R., Pexman, P., & Siakaluk, P. D. (2014). Effects of relative embodiment in lexical and semantic processing of verbs. *Acta Psychologica*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-relative-embodiment-in-lexical-and-of-Sidhu-Kwan/35717678fec81f11e3c0bb2c387bc880ed9dbad4#citing-papers>
- Siegel, A. L. M., Schwartz, S. T., & Castel, A. D. (2021). Selective memory disrupted in intra-modal dual-task encoding conditions. *Memory & Cognition*, *49*(7), 1453–1472. <https://doi.org/10.3758/s13421-021-01166-1>
- Sigiru, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 910–919. <https://10.1162/089892901753165827>
- Simmons, W. K., Ramjee, V., Beauchamp, M. S., McRae, K., Martin, A., & Barsalou, L. W. (2007). A common neural substrate for perceiving and knowing about color. *Neuropsychologia*, *45*(12), 2802. <https://10.1016/j.neuropsychologia.2007.05.002>
- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 910–919. <https://doi.org/10.1162/089892901753165827>
- Sivashankar, Y., & Fernandes, M. A. (2021). Enhancing memory using enactment: Does meaning matter in action production? *Memory*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/09658211.2021.1995877>
- Slamecka, N. J., & Graf, P. (1978). The generation effect: Delineation of a phenomenon. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *4*(6), 592–604. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.4.6.592>
- Smith, S. M. (1979). Remembering in and out of context. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *5*(5), 460–471. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.5.5.460>
- Smith, S. M., Glenberg, A., & Bjork, R. A. (1978). Environmental context and human memory. *Memory & Cognition*, *6*(4), 342–353. <https://doi.org/10.3758/BF03197465>
- Sternberg, S. (1966). High-Speed Scanning in Human Memory. *Science*, *153*(3736), 652–654. <https://10.1126/science.153.3736.652>

- The Tommy Edison Experience. (2017, 20 juin). Do blind people understand transparency, translucency, and reflections ? [Vidéo]. *YouTube*.
<https://www.youtube.com/watch?v=UoyYSAAY3ks>
- Thomas, N. J. T. (1999). Are theories of imagery theories of imagination? An active perception approach to conscious mental content. *Cognitive Science*, 23(2): 207–245.
[https://10.1016/S0364-0213\(99\)00004-X](https://10.1016/S0364-0213(99)00004-X)
- Thomas, N. J. T. (2014). *Mental imagery*. <https://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery>
- Tsuchiya, N., & Koch, C. (2005). Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nature Neuroscience*, 8, 1096–1101. <http://dx.doi.org/10.1038/nn1500>
- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352–373. <https://10.1037/h0020071>
- Ulrich, M., Harpaintner, M., Trumpp, N. M., Berger, A., & Kiefer, M. (2023). Academic training increases grounding of scientific concepts in experiential brain systems. *Cerebral Cortex*, 33(9), 5646–5657. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac449>
- Vallet, G., Simard, M., Fortin, C., Versace, R., & Mazza, S. (2011). L'altération des connaissances sémantiques est-elle liée à une altération du traitement perceptif? Étude des atteintes catégories-spécifiques dans la démence sémantique. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillessement*, 9(3), 327-335.
- Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-in: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(3), 280–306.
<https://doi.org/10.1080/20445911.2014.892113>
- Vigliocco, G., Kousta, S.-T., Della Rosa, P. A., Vinson, D. P., Tettamanti, M., Devlin, J. T., & Cappa, S. F. (2014). The Neural Representation of Abstract Words: The Role of Emotion. *Cerebral Cortex*, 24(7), 1767–1777. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht025>
- Villani, C., Lugli, L., Liuzza, M. T., & Borghi, A. M. (2019). Varieties of abstract concepts and their multiple dimensions. *Language and Cognition*, 11(3), 403–430.
<https://doi.org/10.1017/langcog.2019.23>
- Villani, C., Lugli, L., Liuzza, M. T., Nicoletti, R., & Borghi, A. M. (2021). Sensorimotor and interoceptive dimensions in concrete and abstract concepts. *Journal of Memory and Language*, 116, 104173. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104173>

- Walker, I., & Hulme, C. (1999). Concrete words are easier to recall than abstract words: Evidence for a semantic contribution to short-term serial recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *25*(5), 1256–1271. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.25.5.1256>
- Wammes, J. D., Meade, M. E., & Fernandes, M. A. (2016). The drawing effect: Evidence for reliable and robust memory benefits in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *69*(9), 1752–1776. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1094494>
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1984). Category specific semantic impairments. *Brain*, *107*(3), 829–853. <https://10.1093/brain/107.3.829>
- Weinberg, R. (2008). Does imagery work? Effects on performance and mental skills. *Journal of Imagery Research in Sport and Physical Activity*, *3*(1). <https://10.2202/1932-0191.1025>
- Willems, R. M., Toni, I., Hagoort, P., & Casasanto, D. (2009). Body-specific motor imagery of hand actions: Neural evidence from right- and left-handers. *Frontiers in Human Neuroscience*, *3*. <https://10.3389/neuro.09.039.2009>
- Wilson, M. (2008). How Did We Get from There to Here? An Evolutionary Perspective on Embodied Cognition. P., Calvo & A., Gomila (Eds). *Handbook of Cognitive Science: An Embodied Approach*. pp. 375–393. <https://10.1016/B978-0-08-046616-3.00019-0>
- Witt, J. K., Kemmerer, D., Linkenauger, S. A., & Culham, J. (2010). A Functional Role for Motor Simulation in Identifying Tools. *Psychological Science*, *21*(9), 1215–1219. <https://10.1177/0956797610378307>
- Yeh, W., & Barsalou, L. W. (2006). The situated nature of concepts. *American Journal of Psychology*, *119*(3), 349–384. <https://doi.org/10.2307/20445349>
- Yu, Z., Guindani, M., Grieco, S. F., Chen, L., Holmes, T. C., & Xu, X. (2022). Beyond t-test and ANOVA: applications of mixed-effects models for more rigorous statistical analysis in neuroscience research. *Neuron*, *110*(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.10.030>
- Zatorre, R. J., Halpern, A. R., Perry, D. W., Meyer, E. & Evans, A. C. 1996 Hearing in the mind's ear: a PET investigation of musical imagery and perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 29–46. <https://10.1162/jocn.1996.8.1.29>
- Zdrzilova, L., & Pexman, P. M. (2013). Grasping the invisible: Semantic processing of abstract words. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(6), 1312–1318. <https://10.3758/s13423-013-0452-x>

- Zeman, A., Dewar, M., & Della Sala, S. (2015). Lives without imagery - congenital aphantasia. *Cortex*, 73, 378e380. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.05.019>
- Zwaan, R. A. (2016). Situation models, mental simulations, and abstract concepts in discourse comprehension. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 1028–1034. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0864-x>
- Zwaan, R. A., & Pecher, D. (2012). Revisiting Mental Simulation in Language Comprehension: Six Replication Attempts. *PLoS One*, 7(12), e51382. <https://10.1371/journal.pone.0051382>

ANNEXES

Annexes du Chapitre 1

Instructions détaillées

Groupe répétition mentale. “Vous allez écouter une liste de 30 mots. A chaque mot présenté, répétez-le mentalement. Ne marquez rien sur la feuille tant que la liste n’est pas terminée. Quand la liste est terminée, je vous indiquerai quand vous pourrez écrire les mots que vous avez retenus sur la feuille. Après avoir écrit tous les mots, indiquez à quel point il a été facile de vous répéter mentalement les mots et à quel point vous vous êtes basé sur cette répétition mentale pour retrouver le mot. Essayez de regrouper le moins possible les mots et d’effectuer la tâche pour chaque mot, indépendamment des autres. Vous allez avoir 5 minutes et 30 secondes pour rappeler les mots sur la feuille et remplir les échelles associées.”

Groupe imagerie visuelle. “Vous allez écouter une liste de 30 mots. A chaque mot présenté, créez une image mentale de l’objet que le mot désigne. Ne marquez rien sur la feuille tant que la liste n’est pas terminée. Quand la liste est terminée, je vous indiquerai quand vous pourrez écrire les mots que vous avez retenu sur la feuille. Essayez d’utiliser un maximum les images mentales que vous avez construites pour vous aider à vous rappeler des mots. Après avoir écrit tous les mots, indiquez à quel point il a été facile de créer une image mentale et à quel point vous vous êtes basé sur l’image mentale pour retrouver le mot. Essayez de regrouper le moins possible les images et d’effectuer la tâche pour chaque mot, indépendamment des autres. Vous allez avoir 5 minutes et 30 secondes pour rappeler les mots sur la feuille et remplir les échelles associées.”

Groupe imagerie motrice 3ème personne. Vous allez écouter une liste de 30 mots. A chaque mot présenté, imaginez que l’objet que le mot désigne apparaît devant vous et que vous le prenez et vous le jetez contre le mur en face de vous. Imaginez-vous faire cette action d’un point de vue extérieur, en vous regardant comme si vous pouviez voir hors de votre corps. Ne marquez rien sur la feuille tant que la liste n’est pas terminée. Quand la liste est terminée, je vous indiquerai quand vous pourrez écrire les mots que vous avez retenu sur la feuille. Essayez d’utiliser un maximum les séquences mentales que vous avez construites pour vous aider à vous rappeler des mots. Essayez de regrouper le moins possible les objets que vous imaginez et d’effectuer la tâche pour chaque mot, indépendamment des autres. Après avoir écrit tous les mots, indiquez à quel point il a été facile de vous imaginer de la sorte et à quel point vous

vous êtes basé sur cela pour retrouver le mot. Vous allez avoir 5 minutes et 30 secondes pour rappeler les mots sur la feuille et remplir les échelles associées.

Groupe imagerie motrice 1ère personne. Vous allez écouter une liste de 30 mots. A chaque mot présenté, imaginez que l'objet que le mot désigne apparaît devant vous et que vous le prenez et vous le jetez contre le mur en face de vous. Imaginez-vous faire cette action de votre propre point de vue, comme si vous regardiez à travers vos propres yeux et voyiez vos mains exécuter l'action devant vous. Ne marquez rien sur la feuille tant que la liste n'est pas terminée. Quand la liste est terminée, je vous indiquerai quand vous pourrez écrire les mots que vous avez retenu sur la feuille. Essayez d'utiliser un maximum les séquences mentales que vous avez construites pour vous aider à vous rappeler des mots. Après avoir écrit tous les mots, indiquez à quel point il a été facile de vous imaginer de la sorte et à quel point vous vous êtes basé sur cela pour retrouver le mot. Essayez de regrouper le moins possible les objets que vous imaginez et d'effectuer la tâche pour chaque mot, indépendamment des autres. Vous allez avoir 5 minutes et 30 secondes pour rappeler les mots sur la feuille et remplir les échelles associées.

Mots

| | <i>Score d'expérience sensorielle</i> | | <i>Disponibilité du contexte</i> | <i>Valence émotionnelle</i> | <i>Intensité émotionnelle</i> | <i>Fréquence</i> | <i>Valeur d'imagerie</i> |
|-----------|---|------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------|
| | <i>Concrétude</i> | | | | | | |
| Pomme | 4.97 | 4.96 | 4.30 | 3.60 | 2.06 | 56689.00 | 4.92 |
| Ciseaux | 3.66 | 4.92 | 3.93 | 2.87 | 3.03 | 5811 | 4.56 |
| Oignon | 4.3 | 4.80 | 3.83 | 3.59 | 2.72 | 29710.00 | 4.48 |
| Colle | 4.36 | 3.90 | 2.97 | 2.97 | 2.76 | 12118.00 | 4 |
| Marteau | 3.18 | 4.90 | 3.87 | 2.97 | 3.21 | 6154 | 4.64 |
| Cigarette | 3.67 | 4.80 | 4.33 | 1.53 | 3.03 | 14490 | 4.71 |
| Fleur | 5.09 | 4.53 | 3.90 | 4.52 | 1.55 | 97085.00 | 4.6 |
| Poupée | 3.97 | 4.72 | 3.80 | 3.63 | 2.29 | 9212 | 4.52 |
| Crayon | 4.36 | 4.87 | 4.40 | 3.43 | 2.34 | 13699.00 | 4.68 |
| Bougie | 4.64 | 4.57 | 3.90 | 3.86 | 1.69 | 14755.00 | 4.8 |
| Stylo | 3.75 | 4.92 | 4.13 | 3.60 | 2.44 | 7799 | 4.84 |
| Perle | 4.42 | 4.77 | 3.53 | 4.07 | 2.10 | 19633.00 | 4 |
| Lunettes | 4.36 | 4.80 | 4.40 | 3.57 | 2.48 | 19919.00 | 4.8 |
| Noix | 4.31 | 4.84 | 3.53 | 3.93 | 2.39 | 21077.00 | 4.64 |
| Bague | 3.97 | 4.70 | 4.13 | 4.20 | 2.66 | 8466 | 4.84 |
| Livre | 3.52 | 4.57 | 3.97 | 4.22 | 1.59 | 428106 | 4.92 |
| Cloche | 4.25 | 4.60 | 3.57 | 3.30 | 3.03 | 11820.00 | 4.52 |
| Dent | 4.78 | 4.92 | 4.07 | 2.73 | 2.94 | 33160.00 | 4.8 |
| Ballon | 4.15 | 4.73 | 3.67 | 3.83 | 2.48 | 33708.00 | 4.52 |
| Clef | 3.75 | 4.64 | 3.90 | 3.67 | 2.56 | 30413 | 4.52 |
| Fraise | 5.36 | 4.73 | 3.60 | 4.48 | 1.69 | 12274.00 | 4.92 |

| | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|----------|------|
| bouteille | 4.63 | 4.88 | 4.10 | 3.43 | 2.64 | 39219.00 | 4.88 |
| Brosse | 3.69 | 4.52 | 3.90 | 3.23 | 2.47 | 5519 | 4.28 |
| Balle | 3.91 | 4.68 | 3.80 | 3.53 | 3.12 | 34161 | 4.52 |
| Collier | 3.66 | 4.64 | 3.83 | 3.76 | 2.53 | 12592 | 4.36 |
| Pain | 5.03 | 4.87 | 4.30 | 4.27 | 1.93 | 60425.00 | 4.88 |
| Téléphone | 3.58 | 4.93 | 4.63 | 3.75 | 2.83 | 150204 | 4.92 |
| Sel | 5.42 | 4.50 | 3.20 | 3.11 | 2.66 | 67840.00 | 4.52 |
| Banana | 4.52 | 4.97 | 4.23 | 3.63 | 2.10 | 12892.00 | 4.92 |
| Couteau | 3.74 | 4.93 | 4.20 | 2.77 | 3.45 | 17977 | 4.72 |

Annexes du Chapitre 2

Instructions détaillées

Consigne imagerie motrice située

Pour chaque objet, imaginez-vous la situation suivante : Vous êtes avec votre ami·e, dans une pièce/un endroit cohérent avec l'objet. L'objet est posé sur une table. Votre ami·e, qui est à 3 mètres de vous, a besoin de l'objet. Vous le prenez, lui lancez en ajustant votre geste afin que l'objet atterrisse dans ses mains.

Exemple pour le mot "citron" : Vous êtes dans votre cuisine et le citron est posé sur la table de la cuisine. Votre ami·e en a besoin, vous le prenez et le lui lancez afin qu'elle·il l'attrape dans ses mains.

Imaginez-vous faire cette action de votre propre point de vue, comme si vous regardiez à travers vos propres yeux et voyiez vos mains exécuter l'action devant vous.

A chaque mot, il vous sera demandé :

- quelle est la force nécessaire pour jeter l'objet (de 1 à 10)
- dans quelle pièce vous vous imaginez jeter l'objet

Pour chaque mot présenté, vous aurez **7 secondes pour imaginer** ces éléments et **15 secondes pour donner des renseignements** sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez. Cliquez sur la flèche lorsque que vous êtes prêt·e, la liste va se lancer après un compte à rebours.

Consigne imagerie motrice

Pour chaque mot, imaginez-vous jeter contre le mur chaque objet. Imaginez-vous faire cette action de votre propre point de vue, comme si vous regardiez à travers vos propres yeux et voyiez vos mains exécuter l'action devant vous.

A chaque mot, il vous sera demandé :

- quelle est la force nécessaire pour jeter l'objet (de 1 à 10)
- comment vous tenez l'objet pour le jeter : avec une prise puissante en prenant l'objet à pleine main (comme pour lancer une balle) ou une prise de précision en le lançant du bout des doigts (comme pour lancer une fléchette)



Pour chaque mot présenté, vous aurez 7 secondes pour imaginer ces éléments et 15 secondes pour donner des renseignements sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez. Cliquez sur la flèche lorsque que vous êtes prêt·e, la liste va se lancer après un compte à rebours.

Consigne imagerie visuelle

Pour chaque mot, créez une image mentale de l'objet qu'il désigne. Il s'agit de visualiser mentalement les détails de l'objet comme sa forme et sa couleur.

A chaque mot, il vous sera demandé :

- la couleur de l'objet imaginé
- si l'objet contient au moins un angle droit

Pour chaque mot présenté, vous aurez 7 secondes pour imaginer ces éléments et 15 secondes pour donner des renseignements sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez. Cliquez sur la flèche lorsque que vous êtes prêt-e, la liste va se lancer après un compte à rebours.

Consigne répétition mentale

Pour chaque mot, répétez-le dans votre tête.

A chaque mot, il vous sera demandé :

- combien de syllabes contient le mot
- s'il rime avec le mot "courrier"

Pour chaque mot présenté, vous aurez 7 secondes pour vous répéter mentalement le mot et 15 secondes pour donner des renseignements sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez. Cliquez sur la flèche lorsque que vous êtes prêt-e, la liste va se lancer après un compte à rebours.

Consignes S+M+I

Pour chaque objet, il vous sera indiqué une **action** à imaginer exécuter sur celui-ci dans la situation suivante : Vous êtes avec votre ami-e, dans une **pièce/un endroit** (à l'intérieur ou à l'extérieur) **cohérent avec l'objet**. Votre ami-e a besoin de l'objet mais ne sait pas s'en servir. Vous montrez à votre ami-e comment on s'en sert, sans lui parler, juste en effectuant l'action devant lui/elle.

Par exemple, s'il vous est demandé de "manger une orange" : Il faut vous imaginer,, vous et votre ami-e, dans votre cuisine. Vous montrez à votre ami-e comment on mange une orange : vous la pelez et croquez dans un quartier devant lui/elle.

Imaginez-vous faire cette action de votre propre point de vue, comme si vous regardiez à travers vos propres yeux et voyiez vos mains exécuter l'action devant vous.

A chaque mot, il vous sera ensuite demandé :

- à quel point l'**action d'utilisation est facile à montrer** et faire comprendre à votre ami-e qui ne sait pas se servir de l'objet (de 1 = très difficile, mon ami-e n'arrivera pas à reproduire l'action d'elle/lui-même ou vous ne savez pas vous-même comment utiliser l'objet/cela demande un trop grand niveau d'expertise à 10 = très facile, mon ami-e pourra la reproduire sans problème)
- dans quel **lieu** vous vous êtes imaginé

Pour chaque mot présenté, vous aurez **7 secondes pour imaginer** ces éléments et **15 secondes pour donner des renseignements** sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez.

Consignes SM+I

Pour chaque objet, il vous sera indiqué une **action** à imaginer exécuter sur celui-ci dans la situation suivante : Vous êtes avec votre ami·e, dans une **pièce/un endroit** (à l'intérieur ou à l'extérieur). Votre ami·e a besoin de l'objet mais ne sait pas s'en servir. Vous montrez à votre ami·e comment on s'en sert, sans lui parler, juste en effectuant l'action devant lui/elle. **Imaginez le même lieu pour tous les objets.**

Par exemple, s'il vous est demandé de "manger une orange" : Il faut vous imaginer,, vous et votre ami·e, dans la pièce que vous avez décidé d'imaginer au début de la liste (ex. votre cuisine, votre garage). Vous montrez à votre ami·e comment on mange une orange : vous la pelez et croquez dans un quartier devant lui/elle.

Pour le mot suivant, vous devez imaginer l'objet et l'action toujours dans ce même lieu.

Imaginez-vous faire cette action de votre propre point de vue, comme si vous regardiez à travers vos propres yeux et voyiez vos mains exécuter l'action devant vous.

Pour le mot suivant, vous devez imaginer l'objet et l'action toujours dans le premier lieu. A chaque mot, il vous sera ensuite demandé :

- à quel point l'**action d'utilisation est facile à montrer** et faire comprendre à votre ami·e qui ne sait pas se servir de l'objet (de 1 = très difficile, mon ami·e n'arrivera pas à reproduire l'action d'elle/lui-même ou vous ne savez pas vous-même comment utiliser l'objet/cela demande un trop grand niveau d'expertise à 10 = très facile, mon ami·e pourra la reproduire sans problème)
- à quel point le **lieu est cohérent** avec l'objet (de 1 = très peu cohérent, ex. un citron dans un garage, à 10 = très cohérent, ex. une orange dans une cuisine)

Pour chaque mot présenté, vous aurez **7 secondes pour imaginer** ces éléments et **15 secondes pour donner des renseignements** sur ces 2 caractéristiques. Vous pouvez fermer les yeux si vous le voulez.

Mots

| Liste entraînement 1 | Liste expérimentale 1 | Liste entraînement 2 | Liste expérimentale 2 |
|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| une gaufre | une pomme | des chips | une ampoule |
| du foin | des ciseaux | une enveloppe | une chaussette |
| une figue | une colle | une voile | une pierre |
| un accordéon | un marteau | une frite | un cendrier |
| un pull | une cigarette | une algue | un citron |
| un tambour | une fleur | une horloge | du bois |
| un poivron | une bougie | de la neige | une flûte |
| un manteau | un stylo | une scie | une aiguille |
| un jean | une perle | de l'or | une cuillère |
| du thé | des lunettes | une colle | une ceinture |
| | une noix | | une carotte |
| | une bague | | une tasse |
| | un livre | | un violon |

une dent
une clef
une fraise
une bouteille
une brosse
une balle
un collier

une robe
une poêle
une télévision
un riz
un parapluie
une table
un balai

Annexes du Chapitre 3

Toutes les annexes de l'article présenté Chapitre 3 (matériel, code pour les analyses statistiques, stimuli) peuvent être trouvées sur OSF via ce lien : <https://osf.io/cvaf3/>

Annexes du Chapitre 4

Première partie de l'expérience

Après chaque définition il sera demandé :

- à quel point avez-vous déjà révisé ce concept depuis le dernier CM ?
- indiquez à quel point vous pensez avoir compris l'exemple, de 0 (= je n'ai rien compris du tout) à 10 (= j'ai tout compris, je pourrais l'expliquer à quelqu'un d'autre) (*groupe sans imagerie*)
- indiquez à quel point vous arrivez à visualiser l'exemple, de 0 (= je n'arrive à rien ressentir ou visualiser du tout) à 10 (= je ressens et visualise l'exemple de manière parfaitement claire, aussi nette et précise qu'une véritable perception) (*groupe avec imagerie*)

La **motivation** est l'investissement qui peut être observé dans la direction, l'intensité, la persistance et la qualité de ce qui est fait ou exprimé.

Sans imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes en face de votre ordinateur, en train de finir votre dossier à rendre avant minuit... il est 23h30. Vous êtes fatigué.e mais vous investissez le peu d'énergie qu'il vous reste dans cette tâche et dirigez vos efforts vers l'achèvement de ce dossier avant 23h50 (direction). Vu le peu de temps imparti restant, vous redoublez d'intensité dans la rédaction (intensité) et ne relâchez pas vos efforts de manière à ne pas perdre de temps (persistance).*

Avec imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Imaginez-vous en face de votre ordinateur, en train de finir votre dossier à rendre avant minuit... il est 23h30. Vous êtes fatigué.e mais vous investissez le peu d'énergie qu'il vous reste dans cette tâche et dirigez vos efforts vers l'achèvement de ce dossier avant 23h50 (direction). Vu le peu de temps imparti restant, vous redoublez d'intensité dans la rédaction (intensité) et ne relâchez pas vos efforts de manière à ne pas perdre de temps (persistance). Ressentez l'effort que vous investissez à mesure que vous tapez le dossier sur votre ordinateur et cette nécessité de ne pas devoir "lâcher" malgré la fatigue.*

Selon Bandura, le **sentiment d'auto-efficacité** est une évaluation subjective de l'apprenant sur ses propres capacités à accomplir une tâche donnée et détermine les performances par ses effets sur la quantité d'effort (temps passé sur la tâche) et aussi sur la qualité de l'effort (stratégies).

Sans imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible.*

Vous devez réviser votre cours en vue d'un partiel de psychologie. Etant donné que vous avez eu un cours captivant, vous avez été très attentif.ve et vous vous rappelez bien du cours. Par conséquent, vous vous sentez confiant.e, tout à fait capable d'apprendre le cours et vous savez que le travail que vous allez fournir sera très utile au moment du partiel."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Vous devez réviser votre cours en vue d'un partiel de psychologie. Imaginez-vous dans un lieu où vous avez l'habitude de travailler. Etant donné que vous avez eu un cours captivant, vous avez été très attentif.ve et vous vous rappelez bien du cours. Par conséquent, vous vous sentez confiant.e, tout à fait capable d'apprendre le cours et vous savez que le travail que vous allez fournir sera très utile au moment du partiel. Ressentez en vous ce sentiment de confiance en vos capacités."

Selon Bandura, le sentiment d'auto-efficacité peut être basé sur les **performances antérieures**. Ces performances représentent la principale source d'information sur son efficacité. Elle est basée sur les expériences de maîtrise personnelle. Les succès répétés augmentent les attentes de maîtrise, les échecs répétés les baissent.

Sans imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Vous êtes confiant.e car par le passé vous avez toujours eu au moins 16/20 pour les examens de cette UE. Par conséquent vous savez que vous êtes bon.ne dans cette discipline."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Visualisez votre environnement et les portes de l'amphithéâtre en face de vous. Vous vous sentez confiant.e car par le passé vous avez toujours eu au moins 16/20 pour les examens de cette UE. Par conséquent vous savez que vous êtes bon.ne dans cette discipline. Ressentez cette assurance en vos capacités, sentez-vous fort.e."

Selon Bandura, le sentiment d'auto-efficacité peut être basé sur **l'observation de la réalisation d'une tâche par d'autres personnes**. Être témoin du succès des autres augmente le sentiment de pouvoir soi-même réussir. En voyant d'autres personnes faire une tâche jugée difficile sans qu'elles subissent de conséquences négatives, on peut s'attendre à pouvoir faire la même chose soi-même.

Sans imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Vous n'êtes pas très rassuré.e quant à vos capacités à réussir l'examen. Vous vous souvenez

alors que vos ami.e.s qui ont passé cet examen l'an dernier s'en sont tous très bien sortis. Vous savez donc que vous aussi pouvez y arriver."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Visualisez votre environnement et les portes de l'amphithéâtre en face de vous. Vous n'êtes pas très rassuré.e quant à vos capacités à réussir l'examen, vous vous sentez faible, désarmé.e face à la tâche. Vous vous souvenez alors que vos ami.e.s qui ont passé cet examen l'an dernier s'en sont tous très bien sortis. Vous savez donc que vous aussi pouvez y arriver. Ressentez votre corps se détendre et sentez-vous vous "renforcer" grâce à cette pensée."

Selon Bandura, le sentiment d'auto-efficacité peut être basé sur **la persuasion par autrui**. Il est possible de persuader les individus à croire qu'ils ont les compétences et capacités pour réussir. Les individus sont amenés, par la suggestion, les encouragements, à croire qu'ils peuvent faire face avec succès à ce qui les a accablés dans le passé.

Sans imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Vous n'avez pas confiance en vos capacités, vous estimez vos chances de réussite assez faibles. Votre ami.e est à vos côtés et remarque votre abattement. Iel décide de vous faire reprendre confiance en vous en vous encourageant. Vous reprenez confiance en vous et jugez soudain que vous êtes apte à réussir cette épreuve."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Vous êtes prêt.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Visualisez votre environnement et les portes de l'amphithéâtre en face de vous. Vous n'avez pas confiance en vos capacités, vous estimez que vos chances de réussite sont assez faibles. Ressentez ce découragement. Votre ami.e est à vos côtés et remarque votre abattement. Iel décide de vous faire reprendre confiance en vous en vous encourageant. Imaginez la.le vous regarder dans les yeux et vous parler avec sincérité. Vous reprenez confiance en vous et vous vous sentez soudain apte à réussir cette épreuve. Ressentez votre corps se relâcher, votre confiance en vos capacités remonter et votre assurance gonfler votre poitrine."

Selon Bandura, le sentiment d'auto-efficacité peut être basé sur **ses propres réactions physiologiques et émotionnelles**. Les situations stressantes et éprouvantes suscitent généralement une stimulation émotionnelle qui peut avoir une valeur informative concernant la compétence personnelle. Les individus sont plus susceptibles de s'attendre à réussir

lorsqu'ils ne sont pas assaillis par une stimulation aversive que lorsqu'ils sont tendus et viscéralement agités.

Sans imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes prêt.e.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Vous stressiez. En vous voyant stresser de la sorte, vous pensez que vous allez perdre vos moyens en face de votre copie et donc que vous n'êtes pas en capacité de réussir l'examen.”*

Avec imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Vous êtes prêt.e.e à rentrer dans l'amphithéâtre où vous avez votre partiel de psychologie. Visualisez votre environnement et les portes de l'amphithéâtre en face de vous. Vous stressiez. Imaginez-vous ressentir votre corps en tension, vos mains devenir moites, votre cœur battre et la "boule" au ventre. En vous voyant stresser de la sorte, vous pensez que vous allez perdre vos moyens en face de votre copie et donc que vous n'êtes pas en capacité de réussir l'examen. Ressentez cette impuissance et cette impression de perdre en force et en énergie.”*

Un individu est dirigé par un **but de performance-approche** lorsque la raison qui le pousse à s'engager dans une activité est le désir de montrer aux autres ses capacités en valorisant sa compétence. Il cherche ainsi à obtenir des jugements positifs (comparaison sociale) en montrant qu'il fait mieux que les autres.

Sans imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous êtes en TD. La semaine dernière vous avez eu un examen sur table à mi-semester et votre enseignant décide d'afficher le classement des notes de chacun.e des étudiant.e.s. Vous êtes au milieu du classement. Le soir même, vous rentrez chez vous réviser le TD avec pour objectif d'être en haut du classement au prochain examen pour montrer aux autres et à l'enseignant que vous êtes le.a meilleur.e.”*

Avec imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Imaginez-vous en TD. La semaine dernière vous avez eu un examen sur table à mi-semester et votre enseignant décide d'afficher le classement des notes de chacun.e des étudiant.e.s. Vous êtes au milieu du classement. Le soir même, vous rentrez chez vous réviser le TD avec pour objectif d'être en haut du classement au prochain examen pour montrer aux autres et à l'enseignant que vous êtes le.a meilleur.e. Ressentez la fierté vous gonfler la poitrine à l'idée d'atteindre ce but.”*

Un individu est dirigé par un **but de performance-évitement** lorsque la raison qui le pousse à s'engager dans une activité est le désir de montrer aux autres ses capacités en protégeant sa compétence. Il cherche ainsi à éviter des jugements négatifs (comparaison sociale) en évitant de montrer ses faiblesses.

Sans imagerie : *“Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible.*

Vous êtes en TD. La semaine dernière vous avez eu un examen sur table à mi-semester et votre enseignant décide d'afficher le classement des notes de chacun.e des étudiant.e.s. Vous êtes au milieu du classement. Le soir même, vous rentrez chez vous réviser le TD avec pour objectif de ne surtout pas être en bas du classement au prochain examen pour ne pas laisser penser aux autres et à l'enseignant que vous êtes un.e nul.le."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Imaginez-vous en TD. La semaine dernière vous avez eu un examen sur table à mi-semester et votre enseignant décide d'afficher le classement des notes de chacun.e des étudiant.e.s. Vous êtes au milieu du classement. Le soir même, vous rentrez chez vous réviser le TD avec pour objectif de ne surtout pas être en bas du classement au prochain examen pour ne pas laisser penser aux autres et à l'enseignant que vous êtes un.e nul.le. Imaginez-vous rougir de honte et votre visage devenir chaud rien qu'à l'idée de ne pas atteindre ce but."

Un individu est dirigé par un **but de maîtrise-approche** lorsque la raison qui le pousse à s'engager dans une activité est le désir d'apprendre et de comprendre. Il cherche à développer sa compétence et à progresser personnellement sans se comparer socialement.

Sans imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous venez de sortir d'un CM qui vous a passionné et donné envie de devenir expert dans ce champ de la psychologie. Vous décidez donc d'aller à la BU lire tous les ouvrages recommandés dans cette UE afin d'être le plus compétent possible dans ce domaine. Vous parcourez donc les étagères de livres afin de les emprunter."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Imaginez-vous sortir d'un CM qui vous a passionné et donné envie de devenir expert dans ce champ de la psychologie. Vous décidez donc d'aller à la BU lire tous les ouvrages recommandés dans cette UE afin d'être le plus compétent possible dans ce domaine. Imaginez-vous parcourir les étagères de livres pour les prendre dans vos mains. Sentez-vous rayonner d'enthousiasme et ressentez cette soif d'apprendre à mesure que vous empruntez ces livres."

Un individu est dirigé par un **but de maîtrise-évitement** lorsque la raison qui le pousse à s'engager dans une activité est le désir d'apprendre et de comprendre. Sans se comparer aux autres, il recherche la perfection dans son apprentissage en évitant toute erreur et la non-maîtrise du cours.

Sans imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le comprendre le plus possible. Vous venez de sortir d'un CM qui vous a passionné et donné envie de devenir expert dans ce champ de la psychologie. Vous décidez donc d'aller à la BU lire tous les ouvrages recommandés dans cette UE afin de ne surtout pas faire d'erreur et de rater un point

important du cours. Vous voulez vous prouver à vous-même que vous maîtrisez parfaitement ce champ de la psychologie. Vous êtes cependant anxieux et redoutez d'avoir une mauvaise note au partiel car cela témoignerait de votre non-maîtrise du cours."

Avec imagerie : "Prenez le temps de bien lire l'exemple afin de le visualiser le plus possible. Imaginez-vous sortir d'un CM qui vous a passionné et donné envie de devenir expert dans ce champ de la psychologie. Vous décidez donc d'aller à la BU lire tous les ouvrages recommandés dans cette UE afin de ne surtout pas faire d'erreur et de rater un point important du cours. Vous voulez vous prouver à vous-même que vous maîtrisez parfaitement ce champ de la psychologie. Vous êtes cependant anxieux et redoutez d'avoir une mauvaise note au partiel car cela témoignerait de votre non-maîtrise du cours. Ressentez cette anxiété, cette "boule" au ventre, cette peur de l'échec qui vous guide dans les rayons de la BU."

Seconde partie de l'expérience

Test de reconnaissance

| Concepts réellement présentés | Leurres |
|--|--|
| La motivation | Les métaconnaissances |
| Le SAE | La planification |
| Les performances antérieures comme source de SAE | L'auto-évaluation |
| L'observation d'autrui comme source de SAE | L'autorégulation |
| La persuasion par autrui comme source de SAE | La charge cognitive |
| Ses propres réactions physiologiques et émotives comme source de SAE | Le traitement génératif |
| Le but de maîtrise-approche | Les stratégies d'élaboration |
| Le but de maîtrise-évitement | La supervision |
| Le but de performance-approche | L'entraînement métacognitif |
| Le but de performance-évitement | Le transfert |
| | Le but de motivation intrinsèque |
| | Le but de motivation extrinsèque |
| | Le but d'efficacité |
| | L'intelligence comme source de SAE |
| | La mémoire procédurale comme source de SAE |
| | Les compétences émotionnelles |
| | La régulation implicite des émotions |

| | |
|--|---|
| | <p>La régulation explicite des émotions</p> <p>Les thérapies émotionnelles</p> <p>Le tuteur motivationnel</p> |
|--|---|

QCMs

La motivation :

- est un investissement
- peut être le contrôle qu'un système cognitif peut avoir de lui-même et de son propre fonctionnement
- peut être une décision sur ce qui doit être appris et comment cela doit être appris
- comprend la notion de contrôlabilité
- comprend la notion de persistance
- comprend la notion d'intensité

Selon Bandura, le sentiment d'auto-efficacité est :

- une évaluation objective de l'apprenant sur ses potentialités à réussir une tâche donnée
- une évaluation objective de l'apprenant sur ses propres capacités à apprendre en général
- la connaissance et le contrôle qu'un système cognitif peut avoir de lui-même et de son propre fonctionnement
- une évaluation subjective de l'apprenant sur ses propres capacités à accomplir une tâche donnée
- une pensée préalable à la mobilisation de stratégies cognitives, une décision sur ce qui doit être appris et comment cela doit être appris
- peut être intrinsèque ou extrinsèque

Selon Bandura, les performances antérieures à une tâche :

- nous permettent d'inférer notre maîtrise de cette tâche
- peuvent faire baisser notre sentiment d'auto-efficacité
- peuvent faire augmenter notre sentiment d'auto-efficacité
- représentent une source secondaire de sentiment d'auto-efficacité
- n'influencent pas notre sentiment d'auto-efficacité

- influencent l'évaluation subjective de nos capacités à faire une tâche

Selon Bandura, l'observation d'autrui :

- peut nous renseigner sur nos capacités à réussir à une tâche
- peut nous faire regagner confiance en nous
- peut uniquement faire baisser l'estimation de notre habileté à effectuer une tâche avec succès
- fait augmenter notre sentiment d'auto-efficacité uniquement si l'on observe un.e ami.e
- fait baisser notre sentiment d'auto-efficacité uniquement si l'on observe un.e ami.e
- peut rendre l'évaluation de nos capacités plus positive, notamment lorsque nos proches effectuent une tâche que l'on juge difficile

Selon Bandura, notre réaction émotionnelle face à une tâche d'apprentissage :

- peut nous décourager
- peut entacher notre diagnostic métacognitif
- peut nous encourager
- nous informe sur notre capacité à réussir une tâche
- influence positivement nos attentes de performances à la tâche lorsque l'on est anxieux
- fait baisser nos stratégies d'auto-régulation lorsque que l'on est anxieux

Selon Bandura, la persuasion par autrui :

- peut nous décourager
- peut entacher notre diagnostic métacognitif
- peut nous encourager
- n'influence pas notre performance
- influence notre sentiment d'auto-efficacité que si l'on ne connaît pas la personne
- peut faire baisser notre quotient intellectuel

Un but de maîtrise-approche c'est :

- apprendre pour comprendre
- apprendre pour se valoriser auprès des autres
- apprendre par peur d'échouer

- apprendre par peur d'être dévalorisé.e par les autres
- apprendre pour augmenter sa compétence
- apprendre sans se comparer aux autres

Un but de maîtrise-évitement c'est :

- apprendre pour comprendre
- apprendre pour se valoriser auprès des autres
- apprendre par peur d'échouer
- apprendre par peur de paraître nul.le auprès des autres
- apprendre pour éviter de mauvais jugements
- apprendre sans se comparer aux autres

Un but de performance-approche c'est :

- apprendre pour comprendre
- apprendre pour se valoriser auprès des autres
- apprendre par plaisir pour l'objet d'apprentissage
- apprendre par essai-erreur
- apprendre en évitant de montrer aux autres qu'on est en échec
- apprendre sans se comparer aux autres

Un but de performance-évitement c'est :

- apprendre pour comprendre
- apprendre pour soi
- apprendre dans le but de ne pas montrer aux autres qu'on est en échec
- apprendre par peur de paraître nul.le auprès des autres
- apprendre pour augmenter sa compétence
- apprendre sans se comparer aux autres

RÉSUMÉ

Ce travail de thèse s'ancre théoriquement dans une vision incarnée selon laquelle la récupération mnésique serait une simulation des expériences perceptives, motrices et introspectives de l'encodage. Nous avons donc cherché à démontrer que la pratique de l'imagerie mentale au moment de l'apprentissage permet d'activer une telle simulation pouvant, par la suite, être plus facilement rétablie au moment de la récupération, et ainsi favoriser les chances de remémoration. A travers les différentes expériences de cette thèse, cette hypothèse a été en partie corroborée en mettant en évidence un impact globalement positif de l'utilisation de stratégies d'imagerie mentale sur le rappel d'informations verbales. Nous avons pu confirmer l'existence d'un gradient d'efficacité mnésique suivant un continuum d'incarnation, allant de stratégies peu incarnées n'impliquant pas d'imagerie mentale (e.g., répétition mentale) à des stratégies plus incarnées impliquant une imagerie mentale des interactions sensorimotrices. La présence de ces éléments sensorimoteurs était d'autant plus utile s'ils étaient intégrés dans une situation cohérente (i.e., via l'imagerie motrice située). L'imagerie mentale s'est révélée aussi une stratégie pertinente pour la mémorisation de mots abstraits, ces derniers étant plus facilement récupérables en mémoire lorsque les processus de mémorisation sont explicitement orientés vers leur contenu expérientiel que lorsqu'ils sont orientés vers des caractéristiques plus linguistiques. Enfin, il était prévu que les bénéfices mnésiques issus d'une imagerie mentale incarnée puissent s'appliquer à des situations écologiques telles que l'apprentissage de concepts à l'université. Cependant, le fait d'explicitement demander aux participants d'imaginer des situations en lien avec les concepts ne les a pas aidés à mémoriser ces derniers comparé à une condition contrôle sans instruction explicite.

ABSTRACT

This thesis is theoretically rooted in an embodied vision of memory retrieval as a simulation of the perceptual, motor and introspective experiences of encoding. We have therefore sought to demonstrate that the practice of mental imagery at the time of learning activates such a simulation, which can then be more easily reinstated at the time of retrieval, thus promoting the chances of recollection. This hypothesis has been partially corroborated by the various experiments carried out in this thesis, which have shown that the use of mental imagery strategies has an overall positive impact on the recall of verbal information. We were able to confirm the existence of a gradient of memory efficiency along a continuum of embodiment, ranging from less embodied strategies not involving mental imagery (e.g., mental rehearsal) to more embodied strategies involving mental imagery of sensorimotor interactions. The presence of these sensorimotor elements was all the more useful if they were integrated into a coherent situation (i.e., via situated motor imagery). Mental imagery also proved to be a relevant strategy for the memorization of abstract words, the latter being more easily retrieved from memory when memorization processes are explicitly oriented towards their experiential content than when they are oriented towards more linguistic features. Finally, it was anticipated that the memory benefits of embodied mental imagery could be applied to ecological situations such as learning concepts at university. However, explicitly asking participants to imagine situations related to the concepts did not help them memorize these concepts compared to a control condition without explicit instruction.