

Profil cognitif des aphantasiques : étude exploratoire des stratégies de compensation spatiales et abstraites

Simulation de données et analyses prévisionnelles
dans le cadre de l'UE Data Science

Maël Delem
Colin Fourment
Thomas Junoy
Guillaume Leal de Almeida



13/02/2023

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Imagerie visuelle et aphantasie	2
1.2	Les corrélats de l'aphantasie	3
1.2.1	Corrélats cognitifs	4
1.2.2	Corrélats comportementaux et physiologiques	4
1.2.3	L'aphantasie est elle un trouble ?	5
1.2.4	Expériences de vie et "styles cognitifs"	7
1.3	Stratégies et mécanismes de compensation possibles dans l'aphantasie	8
1.3.1	Opposition entre le visuel et l'abstrait	8
1.3.2	Stratégies verbales, sémantiques et abstraites	8
1.3.3	Imagerie visuelle-objet et visuospatiale	9
1.4	Objectifs	11
2	Expérience	12
2.1	Méthode	12
2.1.1	Participants	12
2.1.2	Équipement et procédure	13
2.1.3	Questionnaires	14
2.1.4	Tâches	15
2.2	Variables	18
2.3	Hypothèses	18
2.3.1	Imagerie visuelle-objet	18
2.3.2	Imagerie visuospatiale	18
2.3.3	Raisonnement	18
2.3.4	Compréhension en lecture	19
2.3.5	Fonctions exécutives	19
2.4	Simulation	19
2.5	Analyses	20
2.5.1	Transformation des données	20
2.5.2	Analyse Factorielle Multiple et <i>clustering</i>	21
2.5.3	Composition des clusters et profils cognitifs	22
2.6	Résultats	23
2.6.1	Statistiques descriptives	23
2.6.2	Analyse Factorielle Multiple et GGM	24
2.6.3	Analyse en <i>clusters</i>	27
2.6.4	Composition et description des clusters	28
3	Discussion	30
	Références	34
	Annexes	44

1 Introduction

1.1 Imagerie visuelle et aphantasie

L'imagerie visuelle, parfois désignée poétiquement comme le fait de “voir dans les yeux de l'esprit”, désigne l'expérience visuelle quasi-perceptive d'images mentales en l'absence du stimulus externe correspondant ([Monzel et al., 2022](#); [Pearson, 2019](#)). L'imagerie visuelle est considérée par la plupart des gens comme un élément central de leur vie mentale quotidienne, dans la mémorisation et la récupération d'informations sur des lieux, des objets ou des personnes connus, dans le vagabondage mental et la rêverie, voire plus généralement dans la créativité ([A. Zeman et al., 2015](#)). Il a été démontré qu'elle joue un rôle prépondérant dans de nombreux processus cognitifs, tels que la mémoire autobiographique, la mémoire épisodique et la prospection d'événements futurs ([Greenberg & Knowlton, 2014](#)), la mémoire de travail visuelle ([Pearson, 2019](#)).

Cependant, il a été démontré qu'il pouvait exister une grande variabilité interindividuelle dans l'imagerie visuelle, et que certaines personnes pouvaient même en être totalement dépourvues. L'une des toutes premières études sur l'imagerie visuelle, une enquête menée par Sir Francis Galton en 1880, a apporté les premiers témoignages de la grande variété de la capacité des gens à produire des images mentales. Son “enquête sur la table du petit-déjeuner” invitait les participants à visualiser leur table du matin et à évaluer “l'illumination, la définition et la coloration” des images mentales qu'ils en avaient. À son grand étonnement, il a découvert que certaines personnes interrogées, parmi lesquelles beaucoup de ses collègues, dans ses termes des “hommes de science”, ont protesté que l'imagerie mentale leur était inconnue - tout comme les daltoniens ne pouvaient pas concevoir la nature de la couleur, ces personnes ne pouvaient pas concevoir la nature de l'imagerie mentale ([Galton, 1880](#)).

Il est intéressant de noter que, bien qu'il y ait eu une résurgence des recherches et des débats sur l'imagerie mentale à la fin du siècle qui a suivi (e.g. Kosslyn et al. ([1995](#)); Pylyshyn ([2002](#)); Reisberg et al. ([2002](#))), cette condition d’“imagination aveugle” n'a pas suscité beaucoup d'attention. Une exception notable est Faw ([2009](#)), qui a soulevé le fait que les théories des chercheurs sur l'imagerie pourraient être fortement biaisées par leur propre expérience subjective de celle-ci. Il a indiqué que les “non-visualiseurs”, ignorés par la recherche jusqu'à

présent, pourraient représenter 2 à 3 % des personnes, selon son enquête ($N = 2500$). En 2010, Zeman et al. ont rapporté le cas d'un patient qui a perdu la capacité de produire des images mentales après avoir subi une intervention chirurgicale (A. Z. J. Zeman et al., 2010). L'article a attiré l'attention du public après un reportage dans le magazine *Discovery* (Zimmer, 2010) : bien qu'il s'agisse apparemment d'imagination aveugle "acquise", l'article a conduit de nombreuses personnes à se reconnaître dans cette condition et à contacter l'équipe pour témoigner de leur expérience, avec la différence importante qu'elles avaient toujours eu cette absence d'imagerie. En décrivant leurs cas, Zeman et al. (2015) ont créé le terme "*aphantasie*" pour décrire l'absence d'imagerie mentale.

L'aphantasie, en tant que terme et phénomène, a attiré l'attention des médias et a entraîné une augmentation importante du nombre de personnes signalant leur cas d'imagerie extrême (Monzel et al., 2022). Les études à grande échelle sur les extrêmes de l'imagerie visuelle suggèrent une prévalence de 2-4% d'aphantasie dans la population générale (C. J. Dance et al. (2022) : $N = 1004$; A. J. Dawes et al. (2020) : $N = 715$; Faw (2009) : $N = 2500$; Palermo et al. (2022) : $N = 490$; Takahashi et al. (2022) : $N = 2885$; A. Zeman et al. (2020)) avec de nombreuses variations (entre 0,5 et 11%) selon les seuils choisis pour caractériser l'affection. L'étude de l'aphantasie est récente, et bien qu'il n'existe pas actuellement de "profil" clairement défini des individus aphantasiques, la recherche a lentement assemblé plusieurs caractéristiques associées à cette condition.

1.2 Les corrélats de l'aphantasie

Depuis 2015, le nouveau champ scientifique de l'aphantasie a construit un corpus de divers corrélats cognitifs, comportementaux et physiologiques de l'aphantasie. Communément, l'aphantasie est évaluée dans des études à grande échelle en utilisant des auto-rapports qualitatifs et le questionnaire Vividness of Visual Imagery (Marks, 1973), même si le seuil VVIQ choisi pour caractériser les personnes ayant une faible imagerie varie selon les études (entre 16 ~ 30). En utilisant les questionnaires comme point de départ, plusieurs études expérimentales ont été en mesure de corrélater une faible imagerie visuelle avec des caractéristiques distinctes.

1.2.1 Corrélats cognitifs

La plupart des études à grande échelle existantes sur l’aphantasie ont porté sur les capacités de mémoire des aphantasiques, et ont montré des corrélations entre leur faible imagerie et des déficiences en mémoire autobiographique et épisodique (A. J. Dawes et al., 2020; Milton et al., 2021; A. Zeman et al., 2020). Les aphantasiques, lorsqu’on leur demande d’évaluer leur mémoire autobiographique, l’évaluent le plus souvent plus bas que les témoins (A. Zeman et al., 2020, 2015). L’un de ces rapports subjectifs a fait émerger la possibilité d’une association de l’aphantasie avec les syndromes de mémoire autobiographique sévèrement déficiente (Watkins, 2018). En accord avec les auto-rapports et les données neuropsychologiques sur la mémoire épisodique, Dawes et al. (2022) ont démontré, à l’aide de l’Autobiographical Interview, une mesure comportementale de la spécificité et de la richesse des détails épisodiques (combinant donc des évaluations subjectives et objectives) que l’aphantasie était également associée à une réduction des détails épisodiques pour les événements passés et futurs. Leurs résultats sont également en accord avec ceux de Milton et al. (2021) qui ont mis en évidence une réduction de l’“imagination” temporelle et atemporelle, à savoir la capacité à simuler des événements fictifs. L’aphantasie a également été associée à la prosopagnosie - la difficulté à reconnaître les visages (A. J. Dawes et al., 2020; Milton et al., 2021; Palermo et al., 2022; A. Zeman et al., 2020), et à des rêves nocturnes et diurnes qualitativement appauvris (A. J. Dawes et al., 2020; A. Zeman et al., 2020).

1.2.2 Corrélats comportementaux et physiologiques

Comme nous l’avons mentionné, la plupart des études sur l’aphantasie se sont appuyées sur des évaluations subjectives, des questionnaires et des rapports personnels pour identifier et évaluer la condition et l’imagerie visuelle. Bien que les phénomènes subjectifs rapportés par les aphantasiques montrent une cohérence remarquable, les rapports à la première personne et l’introspection restent faillibles (Milton et al., 2021; A. Zeman et al., 2020). Les différences dans les jugements d’imagerie visuelle pourraient être liées à une mauvaise métacognition, résultant en une incapacité des aphantasiques à percevoir consciemment leur imagerie potentiellement effective. Pour surmonter cette limitation, de nouvelles méthodes de mesure de l’imagerie

visuelle et de son absence ont été développées afin de trianguler ces auto-rapports subjectifs avec des marqueurs comportementaux et physiologiques objectifs. Ainsi, il a été démontré que les personnes atteintes d’aphantasie ne présentent pas d’amorçage par l’imagerie visuelle par rapport aux témoins en utilisant le paradigme de rivalité binoculaire basé sur les sens (Keogh & Pearson, 2018, 2020) ; elles se souviennent de moins d’objets et de couleurs que les témoins à partir de scènes étudiées (Bainbridge et al., 2021) ; ils ont montré moins de sensibilité sensorielle dans une tâche d’éblouissement de motifs visuels, ce qui suggère que l’imagerie sensorielle et la sensibilité sensorielle sont liées (C. Dance, 2022; C. J. Dance et al., 2021) ; ils n’ont pas montré de réponse de conductivité cutanée à l’imagerie émotionnelle lors de la lecture de scénarios effrayants (Wicken et al., 2019) ; et enfin, ils n’ont pas montré de réponse pupillaire à des formes claires ou sombres imaginées (Lachlan et al., 2022). Ces deux derniers paradigmes en particulier ont établi les premiers indices physiologiques de la force de l’imagerie sensorielle et phénoménologique, et les premières validations physiologiques de l’aphantasie. L’investigation du phénomène de l’imagerie visuelle par ces méthodes objectives a permis de rassembler des preuves solides en faveur de la conception de l’aphantasie comme une véritable absence (ou une réduction sévère) de l’imagerie visuelle plutôt que comme un déficit métacognitif.

1.2.3 L’aphantasie est elle un trouble ?

L’aphantasie a été associée dans la littérature récente à une série de déficiences et de déficits, et est donc souvent logiquement désignée comme un handicap ou un trouble (e.g. Blomkvist (2022); Fox-Muraton (2021)) ; certaines revues vont jusqu’à caractériser la condition comme un ensemble de déficiences résultant d’un dysfonctionnement d’un système cognitif (Blomkvist, 2022). Bien que ce point de vue puisse être justifié d’une certaine manière si l’on considère que les déficiences de l’imagerie mentale peuvent survenir à la suite de lésions cérébrales, d’opérations chirurgicales ou de troubles psychiatriques - une condition appelée “aphantasie acquise” (Bartolomeo et al., 2020; Cavedon-Taylor, 2021; Farah et al., 1988; Spagna, 2022; Zago et al., 2011; A. Z. J. Zeman et al., 2010), on peut trouver à redire sur plusieurs observations dans l’aphantasie congénitale (c’est-à-dire à vie). Des preuves empiriques provenant de

plusieurs études soulignent que les aphantasiques pourraient n’avoir aucune différence de performance dans divers types de tâches présumées nécessiter une imagerie visuelle.

Tout d’abord, en contraste frappant avec les résultats suggestifs sur la mémoire épisodique, les aphantasiques ont des performances aussi précises que les témoins dans plusieurs paradigmes de mémoire de travail visuelle en laboratoire et en clinique (Keogh et al., 2021; Knight et al., 2022) ; ils ont également les mêmes performances dans les tâches de mémoire clinique évaluant le rappel antérograde (Milton et al., 2021) et la mémoire de reconnaissance pour le matériel verbal et visuel (Bainbridge et al., 2021; Milton et al., 2021) ; ils ne présentent pas de différences significatives dans les tâches de mémoire sémantique (A. J. Dawes et al., 2020; Milton et al., 2021) ; de même, ils ne présentent pas de déficience de la mémoire déclarative générale ou visuelle dans une batterie de tests neuropsychologiques (Pounder et al., 2022). Keogh et al. (2021) soulignent également dans leur étude le fait que les performances des aphantasiques dans les tâches d’imagerie visuelle peuvent s’appuyer sur des stratégies différentes, sur la base des différences notables entre leurs stratégies rapportées, et corroborées par une absence d’effet d’orientation dans leurs réponses, supposé se produire en raison du recrutement sensoriel. Zeman et al. (2020) font état de rapport similaires d’aphantasiques utilisant des stratégies alternatives¹ pour résoudre une tâche de comptage du nombre de fenêtres chez soi : ils expliquaient avoir recours à l’imagerie spatiale, à l’imagerie kinesthésique (i.e. de mouvement), et aux connaissances amodales.

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que les aphantasiques ne présentent pas de problèmes de mémoire de travail, de reconnaissance ou de mémoire déclarative (générale ou visuelle) qui pourraient s’avérer affecter leur vie quotidienne. Ils reflètent également le fait que ces performances pourraient s’appuyer sur des stratégies alternatives non visuelles tout aussi adaptées pour résoudre des problèmes supposés auparavant nécessiter une imagerie visuelle. Ceci plaide pour considérer que les aphantasiques utilisent des approches alternatives qui pourraient ne pas être uniquement de la compensation, mais un tout autre ” mode de fonctionnement humain du traitement de l’information ” (A. Zeman et al., 2020) : si nous

¹Il est à noter que l’utilisation de la terminologie “*stratégie alternative*” et “*compensation*” vient du fait de la majorité des personnes “non-aphantasiques” : elle souligne aussi la difficulté pour quelqu’un disposant d’imagerie visuelle à ne pas voir son absence comme un trouble.

adhérons à ce point de vue, les spécificités des différences entre ces modes restent encore à déterminer.

1.2.4 Expériences de vie et “styles cognitifs”

En accord avec le fait que leur vie quotidienne ne semble pas être affectée par leur état, les aphantasiques sont le plus souvent inconscients de leur celui-ci, qui est de la même manière invisible pour les gens, puisqu’ils ne vivent apparemment pas différemment de n’importe qui d’autre (Kendle, 2017; A. Zeman et al., 2015). Bien qu’il n’existe pas, à ce jour, d’étude systématique du profil démographique des aphantasiques, les résultats préliminaires d’une étude récente (A. Zeman et al., 2020) apportent un éclairage sur les préférences professionnelles potentielles des personnes dotées d’imageries extrêmes. En effet, les données des questionnaires de milliers de participants sur l’imagerie visuelle ont révélé que les extrêmes de ce spectre présentaient des associations comportementales et psychologiques distinctes, y compris des préférences professionnelles : alors que les personnes présentant une imagerie visuelle extrêmement élevée (appelées “hyperphantasiques”) avaient tendance à travailler dans des professions traditionnellement considérées comme “créatives” (à savoir les arts, le design, le divertissement et la communication), les aphantasiques étaient plus susceptibles de travailler dans l’informatique, les mathématiques et les sciences (Crowder, 2018; A. Zeman et al., 2020). Ces résultats apportent un autre argument, d’un point de vue comportemental plus large, vers l’idée d’une tension entre deux “styles cognitifs” (Kozhevnikov et al., 2005), et une vision de l’aphantasie et de l’hyperphantasie comme des conditions équilibrées, avec des avantages et des inconvénients (A. Zeman et al., 2020).

Bien que les affirmations initiales de Galton selon lesquelles les “hommes de science” manquaient d’imagerie mentale aient été contestées depuis - et qu’il ait été démontré qu’il s’agissait d’une généralisation excessive de son observation de quelques répondants particulièrement inhabituels parmi ses collègues scientifiques (Brewer & Schommer-Aikins, 2006) - son récit reste intéressant en suivant l’inférence inverse : Si les aphantasiques sont effectivement très peu nombreux, comme l’ont montré des données plus récentes, ont-ils vraiment tendance à se tourner vers les domaines scientifiques ? Les premiers résultats concernant les aphantasiques semblent corroborer cette intuition. Pourtant, quelles bases cognitives pourraient sous-tendre

ces différentes stratégies mentales des aphantasiques et ces apparentes affinités intellectuelles ? Quelle est la nature des différents “modes” supposés de traitement de l’information visuelle ?

1.3 Stratégies et mécanismes de compensation possibles dans l’aphantasie

1.3.1 Opposition entre le visuel et l’abstrait

Galton expliquait son hypothèse sur les scientifiques par le potentiel antagonisme entre la visualisation d’images mentales et la pensée abstraite et holistique. Il constatait cependant que ses collègues aphantasiques² pouvaient tout de même donner des descriptions précises de scènes visuelles. Il formulait déjà l’hypothèse d’une compensation par d’autres modes de conception, notamment des modes de pensées liés à l’imagerie motrice (la représentation mentale du mouvement et de la sensation de bouger) (Galton, 1880). Dans des études sur le raisonnement et la visualisation mentale, Knauff et Johnson-Laird (2002) ont montré que l’imagerie visuelle pouvait ralentir le processus de raisonnement, contrairement à l’imagerie visuospatiale, spatiale ou à la conceptualisation amodale.

1.3.2 Stratégies verbales, sémantiques et abstraites

Zeman élabore aussi sur la compensation en émettant des hypothèses sur le développement de stratégies alternatives chez les aphantasiques par les domaines verbaux, abstraits ou logiques, et pointe vers l’idée d’un traitement de l’information préférentiellement sémantique et factuel chez les aphantasiques (A. Zeman et al., 2020, 2015). Junichi et Jiro (2020) ont étudié le cas d’un aphantasique par des questionnaires d’auto-évaluation. Le participant présentait des capacités d’imagerie auditive préservées et rapportait avoir recours à des stratégies verbales en réponse à des situations supposées comme nécessitant de l’imagerie visuelle, corroborant les observations de Zeman et al (2020). Ganczarek et al. (2020) ont étudié le cas d’une aphantasique présentant des résultats faibles à la composante “imagerie visuelle-objet” (correspondant à ce qui est couramment appelé “imagerie visuelle”) du questionnaire

²L’appellation est anachronique mais utilisée à des fins de clarté.

OSIVQ, mais des scores spatiaux et verbaux dans la norme, témoignant d’une préférence pour le raisonnement spatial et verbal. Elle ne présentait pas de troubles de la mémoire de travail visuospatiale. Son QI total était élevé (128), avec une différence marquée entre le QI verbal et le QI performance au profit du verbal (138 et 114). Milton et al. (2021) soulignent aussi ce résultat dans leur étude, les participants aphantasiques présentant un QI plus élevé que les participants hyperphantasiques. Une hypothèse liée aux fonctionnements alternatifs pourrait concerner les fonctions exécutives, notamment la flexibilité mentale (capacité de passer d’une tâche cognitive à une autre) : les aphantasiques devant utiliser un plus grand panel de stratégies pour traiter des tâches mentales visuelles, ils pourraient donc présenter des fonctions exécutives de plus haut niveau que la moyenne.

Suggate et Lenhard (2022) ont montré qu’une mesure objective de l’imagerie mentale (l’*Imagery Comparison Task*) était un prédicteur significatif des performances de compréhension en lecture, alors que les auto-évaluations subjectives (le *Plymouth Sensory Imagery Questionnaire* et le *Spontaneous Use of Imagery Survey*) ne montraient pas de lien. Ces résultats montrent donc pour la première fois que les processus d’imagerie mentale sont intrinsèquement liés aux performances en lecture. Cette étude souligne aussi l’intérêt de l’utilisation d’une tâche écologique impliquant les images mentales par rapport aux traditionnels questionnaires.

1.3.3 Imagerie visuelle-objet et visuospatiale

Autre hypothèse reposerait sur la distinction fondamentale dans l’imagerie visuelle entre deux composantes, l’imagerie *visuelle-objet* (c’est-à-dire la représentation mentale des caractéristiques visuelles d’un objet telles que la forme, la luminosité ou la couleur) et l’imagerie *visuelle-spatiale* (ou visuospatiale - i.e. la représentation mentale des emplacements spatiaux et des relations entre les parties d’un objet). Un résultat expérimental cohérent dans toutes les études récentes sur l’aphantasie est l’imagerie spatiale préservée des aphantasiques, par opposition à leur imagerie d’objet altérée. En utilisant l’OSIQ, plusieurs études ont montré qu’il n’y avait pas de différence significative entre les aphantasiques et les témoins sur les items d’imagerie spatiale (Bainbridge et al., 2021; A. J. Dawes et al., 2020; Keogh & Pearson, 2018; Milton et al., 2021; A. Zeman et al., 2020). Les aphantasiques ont obtenu des résultats précis

au test des mannequins et aux tâches de rotation mentale, impliquant la rotation mentale d'avatars ou d'objets (Crowder, 2018; Milton et al., 2021; Pounder et al., 2022) - bien que Pounder et al. (2022) aient signalé des temps de réponse plus lents pour les aphantasiques à très faible imagerie. Dans la même lignée, Bainbridge et al. (2021) ont observé que, lorsqu'on leur demande de dessiner de mémoire une scène vue précédemment, les aphantasiques se souviennent de beaucoup moins d'objets et de façon moins détaillée que les témoins, mais avec des tailles, des emplacements et une organisation corrects, voire plus précis. Ensemble, ces résultats suggèrent que les "aphantasiques" actuellement les plus étudiés sont en fait des *aphantasiques "objets"*, avec une imagerie visuospatiale intacte.

Des résultats intéressants dans la littérature sur l'imagerie spatiale semblent faire écho aux premiers résultats de Zeman et al. (2020) sur les préférences professionnelles des aphantasiques (objet). Les hautes performances dans les tests de visualisation spatiale sont corrélées aux performances professionnelles et académiques dans divers domaines des STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*), notamment la physique, la chimie organique, la géologie, les mathématiques, ainsi que la chirurgie, l'architecture et le raisonnement mécanique (Coleman & Gotch, 1998; Hegarty & Waller, 2005; Keehner et al., 2004; Kozhevnikov et al., 2007; Orion et al., 1997; Wai et al., 2009). D'autres études ont mis en évidence que la réussite dans les STEM reposait sur des capacités fondamentales d'imagerie spatiale telles que l'imagination de structures schématiques ou l'exécution de transformations spatiales mentales (Kozhevnikov et al., 2007; Wai et al., 2009). Ces considérations jettent également un nouvel éclairage sur les observations et les intuitions de Galton (1880) concernant les scientifiques. Blajenkova et al. (Blajenkova et al., 2006a) ont proposé une explication avec le clivage objet-spatial : les scientifiques ne seraient pas complètement déficients en imagerie visuelle générale, comme le suggérait Galton, mais seraient seulement sélectivement déficients en imagerie visuelle-objet.

En outre, les recherches sur les différences individuelles en matière d'imagerie ont démontré que les scientifiques et les ingénieurs ont tendance à être des imageurs spatiaux tandis que les artistes visuels ont tendance à être des imageurs objet (Blajenkova et al., 2006a; Blazhenkova & Kozhevnikov, 2010, 2009; Kozhevnikov et al., 2010; Kozhevnikov et al., 2005). Ces études ont non seulement montré, par le biais de rapports subjectifs, que les artistes et les scientifiques

différait en termes d'imagerie, mais elles ont également mis en évidence des différences de performance : les artistes ont obtenu de meilleurs résultats dans les tâches nécessitant la visualisation d'objets (par exemple, la création de représentations d'images et de couleurs, l'identification d'objets dégradés) ; tandis que les visualiseurs spatiaux et les scientifiques ont obtenu de meilleurs résultats dans les tâches nécessitant une visualisation spatiale (par exemple, la rotation mentale, le pliage de papier, la recherche d'un emplacement). Enfin, Kozhevnikov et al. ([Kozhevnikov et al., 2013](#)) ont constaté que les évaluations de l'imagerie de visualisation d'objets par rapport à celle de visualisation spatiale étaient respectivement et sélectivement associées aux évaluations de créativité artistique par rapport à celle de créativité scientifique.

1.4 Objectifs

Les images mentales sont impliquées dans de nombreux processus cognitifs, comme la mémoire autobiographique, l'imagination du futur, la mémoire de travail visuospatiale, la compréhension du langage, le raisonnement moral, ou encore les rêves. À l'inverse on peut concevoir que certaines tâches soient gênées par la création d'images mentales, par exemple des tâches qui nécessitent des représentations plus abstraites, comme la catégorisation, le raisonnement analogique ou spatial. Sur cette base, l'étude des personnes dépourvues d'imagerie mentale visuelle présente un intérêt particulier pour la compréhension des liens entre différentes fonctions cognitives.

L'objectif de cette étude exploratoire sera donc d'identifier des premiers aspects d'un profil cognitif cohérent des aphantasiques, et plus largement de profils corrélés aux variations dans l'imagerie visuelle, mentale et dans la conceptualisation abstraite. Nous mesurerons les performances de personnes aphantasiques et non-aphantasiques dans différents domaines cognitifs via une batterie de questionnaires, de tests neuropsychologiques et de tâches comportementales liés à l'imagerie visuelle, visuospatiale, au raisonnement verbal et non-verbal, à la mémoire de travail verbale et visuospatiale, ainsi qu'à la flexibilité mentale.

Si les images mentales sont un frein au raisonnement abstrait, nous pouvons faire l'hypothèse que les personnes aphantasiques soient meilleures dans des tâches de catégorisation, de conceptualisation et de raisonnement. Les performances à ces tâches devraient également être

négativement corrélées aux scores d'imagerie mentale (VVIQ, OSIQ-Objet). En conséquence, si les tâches de raisonnement sont liées à l'imagerie abstraite, nous pourrions émettre l'hypothèse que l'imagerie visuelle-objet soit négativement corrélée à certaines composantes de l'imagerie spatiale ou visuo-spatiale. Nous mettrons également en relation leur fonctionnement cognitif avec des tâches nécessitant de l'imagerie mentale mais n'étant pas nécessairement échouées par les aphantasiques. Dans quelle mesure performeraient-ils à une tâche écologique de compréhension de texte censée solliciter la création d'images mentales ? Les performances à cette tâche et à celles de raisonnement sont-elles liées à de meilleures fonctions exécutives ? L'aphantasie est-elle associée à un fonctionnement exécutif et intellectuel général plus élevé ?

Cette étude sera donc exploratoire et nécessitera des outils spécifiques pour analyser nos groupes de participants sans *a priori* et identifier les facteurs les plus significatifs dans leur profil cognitif. Ce dossier aura donc pour objectif de présenter un plan expérimental et analytique pour répondre à cette visée, et présenter une simulation de données et de leur analyse pour illustrer ce propos. Nous introduirons une méthode d'Analyse Factorielle Multiple et des graphes pour identifier les facteurs cognitifs les plus déterminants dans nos données et réduire nos variables, et utiliserons un algorithme de partition non supervisée par la méthode des *k-means* pour étudier la répartition de nos participants dans des groupes pertinents avec leurs profils cognitifs.

2 Expérience

2.1 Méthode

2.1.1 Participants

Nous recruterons des participants à partir de mi-février/début mars, lorsque l'expérience sera codée et prête à être diffusée en ligne. Pour estimer un ordre de grandeur du nombre de participants nécessaire pour obtenir des résultats intéressants, nous pouvons nous baser sur les calculs de puissance de A. J. Dawes et al. (2020), qui ont mené une étude assez proche de la nôtre impliquant douze questionnaires et ayant pour objectif de mieux cerner le profil des aphantasiques. Ceux-ci ont estimé que pour une taille d'effet modérée des comparaisons,

une puissance de 80% et avec un α très conservateur de 0.0002 (voir la section [Analyses](#)), au moins 170 participants seraient nécessaires par groupe expérimental.

Les participants devront avoir entre 18 et 50 ans et être locuteurs natifs français³, avoir une vision normale ou corrigée et ne pas présenter de trouble de la lecture. Les participants aphantasiques seront recrutés en ligne sur des espaces spécifiques à leur condition (forums, groupes sur les réseaux sociaux, etc.). Nous nous intéressons à l'étude de l'aphantasie congénitale, les participants ne devront donc pas présenter d'antécédents de maladies neurologiques ou psychiatriques.

Le critère répandu dans les études sur l'aphantasie pour identifier la condition est celui de l'auto-évaluation par le questionnaire VVIQ (Vividness of Visual Imagery Questionnaire, Marks (1973)), avec un score inférieur à 32 (voir la section [Questionnaires](#)). Nous disposerons aussi de la composante objet de l'OSIQ (Object and Spatial Imagery Questionnaire, Blajenkova et al. (2006b)), fortement corrélée au VVIQ, fournissant donc des items supplémentaires : le seuil inférieur de ce questionnaire est évalué à 36, sur la base de deux écart-types à la moyenne de l'échantillon de Blajenkova et al. (2006b). L'OSIQ, dans sa composante spatiale, sera par ailleurs utilisé pour l'auto-évaluation des capacités d'imagerie visuospatiales des participants, justifiant son utilisation en parallèle du VVIQ.

En l'absence de données réelles de participants, nous avons donc préparé nos analyses prévisionnelles sur des données simulées sur R (R Core Team, 2022). Les paramètres de cette simulation (les résultats potentiels de chaque groupe) ont été basés sur la littérature et sur nos hypothèses : nous définirons donc le protocole dans un premier temps, puis reviendrons sur cette simulation dans la [section 2.4](#) dédiée.

2.1.2 Équipement et procédure

Le protocole sera composé de plusieurs questionnaires et tâches qui seront administrées en ligne via un serveur JATOS (Lange et al., 2015). Les questionnaires seront codés sur

³Il est à noter que dans l'étude de Dawes et al. (2020), 31 pays de résidence ont été répertoriés, avec 83% ($N = 220$) déclarant que l'anglais était leur première langue, et 88% ($N = 235$), s'identifiant comme blancs/caucasiens. Les résultats sont néanmoins cohérents avec le reste de la littérature sur l'aphantasie, avec aucun effet du langage ou de l'origine géographique. Cette étude interroge sur le potentiel intérêt de tenter de diffuser la présente étude à l'international.

SurveyJS⁴, une bibliothèque JavaScript Open Source dédiée à la création de questionnaires, et les tâches seront codées sur OpenSesame (Mathôt et al., 2012), une interface graphique de construction d’expériences comportementales. Avant les premiers questionnaires seront recueillies des données démographiques (âge, genre, métier et/ou études). Tous les participants devront donner leur consentement éclairé avant de commencer l’étude. La participation sera volontaire et sans compensation.

2.1.3 Questionnaires

* *Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ)*

Le VVIQ (Marks, 1973) est une échelle d’auto-évaluation de 16 items qui demande aux participants d’imaginer une personne ainsi que plusieurs scènes et d’évaluer la vivacité de ces images mentales à l’aide d’une échelle de 5 points allant de 1 (“Aucune image, vous savez seulement que vous pensez à l’objet”) à 5 (“Parfaitement clair et aussi vif que la vision normale”). Le score total de 32 conventionnellement utilisé comme la limite pour définir l’aphantasie équivaut à un score de 2 (“vague et faible”) pour chaque item du questionnaire, là où 1 est “Aucune imagerie du tout, vous savez seulement que vous pensez à l’objet”.

* *Object and Spatial Imagery Questionnaire (OSIQ)*.

L’OSIQ (Blajenkova et al., 2006b) est une échelle de 30 items qui demande aux participants d’indiquer dans quelle mesure chacune des affirmations sur la capacité d’imagerie visuelle-objet (par exemple : “Quand j’imagine le visage d’un ami, j’ai une image parfaitement claire et lumineuse”) et sur la capacité d’imagerie visuospatiale (par exemple : “Je suis un bon joueur de Tetris”) s’applique à eux sur une échelle de 5 points allant de 1 (“Totalelement en désaccord”) à 5 (“Totalelement d’accord”). Les domaines de l’imagerie spatiale et de l’imagerie des objets de l’OSIQ comportent chacun 15 items dont la moyenne est calculée pour obtenir un score pour chaque domaine.

* *Metacognition Awareness Inventory (MAI)*.

⁴<https://surveyjs.io/>

Le MAI ([Schraw & Dennison, 1994](#)) est une échelle d’auto-évaluation en 52 items, chaque item évalué sur une échelle allant de 1 à 5. Elle mesure la conscience métacognitive des adultes dans huit sous-composantes rassemblées dans deux larges catégories, la connaissance de la cognition et la régulation de la cognition.

2.1.4 Tâches

- * Matrices Progressives Standard de Raven (RSPM).

Les RSPM ([Raven & Court, 1938](#)) se composent de 60 items divisés en cinq ensembles. Chaque item consiste à compléter une figure manquante dans une matrice de 3x3 figures en extrayant et suivant les règles logiques sous-jacentes à l’organisation des figures entre elles. Les items ont une difficulté croissante. A la fin d’une série, la difficulté redevient facile mais la règle logique change, et les séries entre elles ont une difficulté croissante. Les matrices ont pour objectif d’évaluer le raisonnement abstrait, dans un versant non-verbal de l’intelligence fluide. Nous utiliserons potentiellement une version clinique raccourcie de deux ensembles de 9 items ([Bilker et al., 2012](#)) prédisant le score aux 60 items avec une bonne précision. Ceux-ci pourraient représenter un gain potentiel de 75% du temps, pour des caractéristiques similaires au test complet.

- * Tâche de Wason.

La tâche de Wason ([Wason, 1968](#)) est une très courte tâche de raisonnement se présentant sous la forme d’un problème posé au participant. Pour résoudre celui-ci, le participant doit maîtriser les règles logiques déductives et inférentielles de type “P implique Q” et sa contraposée “Non-Q implique Non-P”.

- * Sous-test des Similitudes de la WAIS-IV.

Le sous-test des similitudes de la WAIS-IV ([Wechsler et al., 2008](#)) est composé de 18 paires de mots dont le participant doit identifier la relation qualitative sous-jacente. Il reflète ainsi les capacités d’abstraction, de formation de concepts et le raisonnement verbal.

- * Empan de chiffres envers.

Une mesure d’empan mnésique consiste à présenter une séquence d’items à un participant, qui doit les reproduire dans l’ordre ou à l’envers. Ici l’empan de chiffres envers (ou *Reverse Digit Span*) consiste à présenter des chiffres au rythme de 1 par seconde, puis de demander au participant de les rappeler du dernier au premier. La tâche commence par une séquence courte, puis s’allonge à chaque réussite. Le score est le nombre maximum de chiffres rappelés (le nombre de séquences correctement rappelées est aussi utilisé dans la littérature). Les mesures d’empan évaluent toutes en partie la mémoire de travail, mais parmi elles le *reverse digit span* est le plus corrélé avec les mesures d’intelligence fluide ou de fonctions exécutives (Groeger et al., 1999).

* Blocs de Corsi.

Les blocs de Corsi sont aussi une tâche d’empan mnésique, mêlée avec de la visualisation spatiale (Gibeau, 2021). La tâche consiste à présenter au participant des blocs disposés aléatoirement dans un cadre, puis afficher une séquence (les blocs changeant de couleur tour à tour pour une version informatisée par exemple) et demander au participant de la rappeler. La tâche commence par une séquence courte qui s’allonge à chaque réussite. De même, le score est le nombre maximum de blocs rappelés.

* *Wisconsin Card-Sorting Test* (WCST).

Dans le WCST (Heaton & Par, 2000), les participants doivent trier 64 cartes en fonction de leur couleur (rouge, bleu, jaune ou vert), de leur forme (croix, cercle, triangle ou étoile) ou du nombre de figures (un, deux, trois ou quatre). Au cours de la tâche, la règle de tri change discrètement de la couleur à la forme ou au nombre de figures sans que les participants en soient informés. Les participants doivent modifier leurs prédictions et choix en conséquence et trier les cartes en suivant la nouvelle règle de tri : ils reçoivent un feedback pour leur réponse (correcte ou erronée), qui doit leur permettre de s’améliorer avec une extraction implicite des règles. Le WCST est utilisé pour mesurer des processus cognitifs de haut niveau tels que l’attention, la persévérance, la mémoire globale, la pensée abstraite ou la capacité de concentration. De plus, pour être capable de changer de catégorie, il faut avoir une grande

flexibilité mentale et une aisance dans la formation de concepts. Le WCST représente donc une évaluation mixte de composantes de raisonnement et de plusieurs fonctions exécutives.

* Compréhension en lecture.

Cette tâche consistera à lire des textes spécifiquement préparés pour requérir de la visualisation mentale et à évaluer les capacités d'extraction d'informations censées être liées aux "images" évoquées par le texte. Les participants auront donc un texte à lire dans un temps limité, puis devront répondre à des questions de compréhension et d'interprétation ou de déduction/inférence sur celui-ci.

* Test de Rotation Mentale (MRT).

La MRT est une tâche composée de 30 items. Chaque item est une image d'un objet de trois dimensions accompagné de quatre réponses possibles : une étant le même objet ayant subi une rotation, les trois autres étant des rotations du miroir de l'objet initial ([Peters et al., 1995](#); [Zhao et al., 2022](#)). Les participants doivent choisir quelle image correspond à la première, avec la consigne d'être le plus rapide possible tout en gardant une précision maximale. La mesure d'intérêt pour cette étude sera la précision (la proportion de réponses justes), d'où la considération de celle-ci comme un "score" pour les analyses (le temps de réaction à la MRT est aussi utilisé dans la littérature, à d'autres fins). Bien que la MRT soit en partie intégrée dans le SRI (voir ci-dessous), elle est l'une des mesures les plus communes pour l'évaluation de l'imagerie spatiale dans la littérature, et l'avoir à des fins de comparaison et de reproductibilité peut être intéressant.

* Spatial Reasoning Inventory (SRI).

Le SRI est un questionnaire évaluant plusieurs composantes de l'imagerie visuospatiale, considérée comme un construit complexe en quatre composantes, pour en avoir le reflet le plus fidèle possible ([Ramful et al., 2017](#)). Il inclut notamment des tests de rotation comme le MRT, mais aussi d'orientation dans l'espace, de manipulation dans l'espace et de visualisation.

2.2 Variables

Nos participants seront initialement divisés en deux groupes, et potentiellement subdivisés par la suite. Le **Groupe** sera donc notre seule **variable indépendante**. Nos **variables dépendantes** seront donc toutes nos mesures : i.e. les **Scores** au VVIQ, à l'OSIQ, au MAI, aux Matrices, aux Similitudes, aux textes de compréhension, au WCST, au MRT, au SRI, la précision au Wason, l'empan mnésique de chiffres, et le nombre de blocs rappelés au Corsi (qui correspond à un empan mnésique spatial) - soit treize scores.

2.3 Hypothèses

2.3.1 Imagerie visuelle-objet

Nous nous attendons à ce que les personnes aphantasiques rapportent une capacité d'imagerie visuelle réduite par rapport aux témoins, conformément aux résultats antérieurs (Keogh & Pearson, 2018; A. Zeman et al., 2015).

2.3.2 Imagerie visuospatiale

Nous nous attendons à ce que les auto-déclarations des aphantasiques concernant les capacités d'imagerie spatiale s'alignent sur les données d'études antérieures suggérant que, malgré l'absence d'imagerie visuelle, les capacités spatiales (mesurées par des questionnaires et les performances sur des tâches de rotation mentale et visuo-spatiales) semblent être largement préservées dans l'aphantasie (Keogh & Pearson, 2018; A. Z. J. Zeman et al., 2010). Dans l'hypothèse que nous émettons de la *compensation* de l'imagerie visuelle réduite chez les aphantasiques, on pourrait s'attendre à des scores plus élevés chez les aphantasiques⁵.

2.3.3 Raisonnement

D'après les données présentées par l'étude de Zeman et al. (2020) - un taux important d'aphantasiques dans les métiers scientifiques) - on peut faire l'hypothèse que le groupe de

⁵Cette hypothèse opérationnelle est celle qui se reflète le plus dans la simulation, illustrant le phénomène mentionné plus bas dans la partie [Simulation](#) de *wishful thinking* de notre part.

participants aphantasiques présentera des capacités de raisonnement (mesurées par le test des Similitudes et les Matrices) plus développés que le groupe de participants non aphantasiques.

2.3.4 Compréhension en lecture

Dans la mesure où les aphantasiques ont un défaut d'imagerie visuelle-objet, si le texte de compréhension en lecture sollicite des images visuelles, on peut s'attendre à des performances différentes à ce texte entre les aphantasiques et les non aphantasiques, potentiellement inférieures en suivant les conclusions de Suggate et Lenhard (2022) : cependant il est à noter que l'imagerie étudiée dans leur étude est plus multi-sensorielle et moins centrée sur l'imagerie spécifiquement visuelle.

2.3.5 Fonctions exécutives

Conformément à l'hypothèse selon laquelle les aphantasiques auraient recours à des stratégies pour compenser leur déficit en imagerie visuelle, des performances élevées en compréhension de texte pourraient être corrélées à des scores élevés aux épreuves mesurant le fonctionnement exécutif et les capacités d'abstraction telles que le WCST.

2.4 Simulation

En suivant les recommandations des analyses de puissance, nous avons décidé de simuler $N = 200$ participants pour chaque groupe, aphantasiques et non-aphantasiques. Pour simuler ceux-ci, nous avons créé une **matrice des moyennes** et des écarts types arbitraires aux douze tâches et questionnaires pour chaque groupe, sur la base de la littérature et de nos hypothèses (avec donc une part inévitable de *wishful thinking* et de prophétie auto-réalisatrice). Ainsi nous avons fixé des moyennes aux tâches d'imagerie objet faibles chez les aphantasiques et hautes chez les contrôles, des scores aux tâches d'imagerie spatiale et de raisonnement légèrement plus élevés chez les aphantasiques, et des scores aux tâches de fonctions exécutives variables.

Nous avons ensuite établi un **modèle de facteurs**, une matrice définissant par des coefficients les liens entre nos douze variables et ce qu'elles "évaluent vraiment", les facteurs cognitifs

sous-jacents. Nous avons choisi d'en désigner cinq : l'*imagerie objet*, l'*imagerie spatiale*, le *raisonnement abstrait*, la *mémoire de travail* et la *flexibilité mentale* (ces deux derniers pouvant être regroupés ou non sous la catégorie de *fonctions exécutives*). Nous aurons donc des corrélations entre nos variables évaluées, qu'il faudra éclaircir pour comprendre les aspects fondamentaux qu'elles révèlent.

Enfin, nous avons fixé un **modèle d'effets**, i.e. une matrice de covariance entre ces cinq capacités cognitives, qui sont loin d'être indépendantes : la littérature pointe par exemple vers des liens entre imagerie spatiale et raisonnement ([Kozhevnikov et al., 2010](#); [Kozhevnikov et al., 2007](#)), ou encore les différentes imageries et la mémoire de travail ([A. J. Dawes et al., 2020](#); [Knight et al., 2022](#); [Salway & Logie, 1995](#)). Nous avons donc pondéré ces liens avec des coefficients arbitraires sur cette base et celle de nos prédictions.

Notre fonction de simulation a donc eu pour tâche, à l'aide de ces trois matrices (*moyennes*, *facteurs*, *effets*), de créer des moyennes aléatoires - bien que liées par les corrélations sous-jacentes - pour chaque tâche et chaque participant, avec une distribution normale et l'ajout d'erreurs aléatoires normales. Les moyennes ont ensuite été standardisées en *z-scores* pour les analyses (et pour les rassembler si nécessaire). La fonction de simulation a été codée sur R ([R Core Team, 2022](#)) (voir [Annexes](#) pour la liste complète des packages cités dans le document, leurs références ainsi que les liens vers le code décrit ici).

2.5 Analyses

2.5.1 Transformation des données

Les analyses prévisionnelles ont de même été réalisées sur R.

Dans la littérature, les mesures réelles de tâches comparables aux nôtres ont des distributions non-normales ([A. Dawes, 2022](#); [A. J. Dawes et al., 2020](#); [Palermo et al., 2022](#)). Après vérification des distributions par des tests de Shapiro-Wilk, nous pourrions dans ce cas réaliser des **tests non-paramétriques** tels que des tests de Kruskal-Wallis ou Mann-Whitney-U. Alternativement, nous pourrions réaliser des **transformations des données** pour les rapprocher de la normalité, de type Box-Cox par exemple. L'étude de Dawes et al. ([2020](#)) utilise une autre transformation centrée sur la médiane permettant de comparer les différences

entre groupes pour chaque tâche selon la même échelle :

$$y = \frac{x - (S.min + \frac{S.max - S.min}{2})}{S.max - S.min}$$

Où y est le score transformé, x le score brut, S.min le score minimum et S.max le maximum. Dans les présentes analyses nous avons choisi la deuxième solution, en standardisant les scores en z-scores via la fonction `scale()` sur R, puis en les ramenant sur une échelle de 0 à 1, avec une médiane à 0.5, via la fonction `rescale()` du package *datawizard* sur R - de sorte à pouvoir construire des profils plus aisément. Nous n'avons pas eu besoin ici d'utiliser une transformation normale, car les données ont déjà été simulées comme tel.

2.5.2 Analyse Factorielle Multiple et *clustering*

Comme nous l'avons mentionné dans la section [Simulation](#), nos variables initiales (les scores) ont pour certaines des corrélations très significatives entre elles du fait de la proximité des capacités cognitives qu'elles évaluent. Nous pourrions alors réduire le nombre de variables en isolant des dimensions essentielles qu'elles représentent par une **Analyse Factorielle Multiple** (AFM). Celle-ci nous permettra alors de combiner les scores de différentes tâches pour les ramener à des scores prédictifs liés à des capacités cognitives (e.g. un score en imagerie visuelle au lieu de deux scores au VVIQ et à l'OSIQ-objet). Cette analyse a ici été conduite sur R via la fonction `factor_analysis()` du package *parameters* et `fviz_pca_var()` du package *factoextra*.

De même, nos groupes initiaux ont été définis de manière arbitraire (une limite de score définie par convention, VVIQ < 32) et pourraient représenter une division imprécise des participants. Pour corriger ce biais potentiel nous réaliserons une **analyse de partition non-supervisée** (dite en *clusters*) par l'algorithme des *k-means*, pour ainsi étudier la répartition en groupes qu'il propose en prenant en compte toutes nos variables redéfinies par l'ACP. L'algorithme fonctionne sur la base d'une *matrice de dissimilarité* selon des distances euclidiennes : i.e. il évalue "géométriquement" selon les axes de nos variables la "distance" entre chaque observation (ici les participants). La distance euclidienne en deux dimensions se

calcule simplement par le théorème de Pythagore. Pour un nombre plus grand de dimensions, la formule généralisée est la suivante :

$$D_{i,j}^2 = \sum_{v=1}^n (x_{vi} - x_{vj})^2$$

“D” étant la distance entre i et j dans n dimensions, égale à la somme des carrés des distances dans chaque dimension. Cette distance, ou “*dissimilarité*”, une fois calculée pour toutes les observations (participants) permet d’obtenir une matrice de des distances entre chacune d’elles. Par suite, l’algorithme des *k-means* utilise cette matrice pour diviser les observations en *k* sous-groupes : il rassemble les observations les plus proches entre elles de sorte à minimiser la superposition entre les clusters, i.e. les observations pouvant se trouver dans plusieurs groupes définis. La détermination de *k* - le nombre de sous-groupes (ou *clusters*) idéal pour une partition intéressante - est une étape importante, et peut se réaliser via de nombreux indices. Nous avons ici utilisé la fonction `n_clusters()` du package *parameters* sur R. L’analyse en *clusters* elle-même a été conduite avec la fonction `cluster_analysis()` du package *parameters* et `kmeans()` du package *stats*, et visualisée avec `fviz_cluster()` de *factoextra*.

2.5.3 Composition des clusters et profils cognitifs

Pour finir, l’algorithme des *k-means* permettra donc de créer des groupes qui auront des profils particuliers sur chaque composante cognitive représentée par nos variables. La composition de ces groupes (en pourcentage d’aphantasiques/non-aphantasiques définis initialement) ainsi que leurs capacités cognitives seront analysées : la variable du *groupe* étant notre seule variable indépendante, nous ajusterons alors des **modèles linéaires** sur nos données et réaliserons des **ANOVAs univariées** en fonction du groupe ainsi que des **t-tests post-hoc** (ou des ANOVAs non-paramétriques et des tests de Mann-Whitney-U dans le cas de données non-normales).

Pour nos comparaisons, nous devons choisir une correction pour compenser les tests multiples, la plus utilisée étant la **correction de Bonferroni**. Dawes et al. (2020) en ont utilisée une très conservatrice pour ajuster l’ α en fonction de leur nombre d’items dans

les questionnaires, donnant $\alpha = 0.05/206 = 0.0002$. Palermo et al. (2022) ont utilisé une correction de $\alpha = 0.05/11 = 0.005$ pour les ANOVAs, et de $\alpha = 0.05/6 = 0.008$ pour les comparaisons post-hoc. Celle que nous utiliserons et le critère pour la choisir restent à définir.

2.6 Résultats

2.6.1 Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives de notre échantillon sont en Table 1. Les scores sont simulés aléatoirement, avec des écarts-types arbitraires et certains aspects sont approximatifs du fait des contraintes techniques de notre simulation (les minima et maxima par exemple sont souvent irréalistes ou impossibles). Dans l'étude réelle nous y adjoindrons les données démographiques collectées : les âges, genres, études et secteurs d'activité des participants, à la fois à des fins exploratoires et de contrôle pour certaines analyses⁶.

Variable	Mean	SD	Min	Max
OSIQ-Objet	43.334579	13.915321	6.6797222	74.14821
OSIQ-Spatial	53.225229	11.679451	22.4601354	89.82966
VVIQ	46.540534	19.248711	3.1098662	91.93256
Raven	22.084263	5.608584	5.1473571	38.84947
Simili	40.034665	5.902302	26.1402045	55.22498
Wason	34.220836	4.077426	20.4101106	46.55095
Empan verbal	7.093107	1.922361	1.6701677	13.07330
WCST	32.761413	4.336859	17.0523285	45.92937
Compréhension en lecture	49.050168	9.264109	21.1663717	74.29158
Corsi	6.439801	2.439217	-0.5900959	15.12490
MRT	17.467141	4.831951	-0.6821389	37.11976
SRI	37.463108	7.429337	14.6270358	69.13171

⁶Le domaine d'intérêt - grossièrement sciences/arts/autres - a par exemple été lié aux capacités d'imagerie objet et spatiale (Kozhevnikov et al., 2013, 2007) : cette variable aurait donc à la fois un intérêt exploratoire (quelle proportion d'aphantasiques ?) et de contrôle (analyse par secteur si celui-ci a un effet significatif).

Variable	Mean	SD	Min	Max
----------	------	----	-----	-----

Table 1: *Statistiques descriptives de l'ensemble des variables mesurées : Moyenne (Mean), Écart-type (SD), Minimum (Min) et Maximum (Max).*

2.6.2 Analyse Factorielle Multiple et GGM

Comme nous l'avons vu, il existe de nombreux liens entre nos variables initiales (ici par construction, à des fins d'observation). Nous avons réalisé des corrélations partielles entre nos variables, qui peuvent être analysées selon la théorie des graphes par des modèles graphiques gaussiens (GGM). Le modèle ajusté à nos variables est représenté en [Figure 1](#) : il a été ajusté à l'aide de la fonction `correlations` du package éponyme. Un GGM comprend un ensemble de variables représentées par des cercles (“nœuds”), et un ensemble de lignes qui visualisent les relations entre elles dont l'épaisseur représente la force de l'association ([Bhushan et al., 2019](#)). Parmi les corrélations remarquables, le VVIQ et l'OSIQ-objet sont extrêmement proches, le MRT, le SRI, l'OSIQ-spatial et les blocs de Corsi (toutes des tâches impliquant de l'imagerie spatiale) forment un réseau très corrélé, l'empan de chiffres est proche des blocs de Corsi (tâches d'empan mnésiques). La [Figure 7](#) en [Annexes](#) présente l'ensemble des coefficients de corrélation partiels et leur significativité.

Nous avons évalué que les données étaient adaptées à une analyse factorielle multiple avec plusieurs indices. La mesure Kaiser, Meyer, Olkin (KMO) de l'adéquation de l'échantillonnage suggère que les données semblent appropriées à une analyse factorielle (KMO = 0,82), et le test de sphéricité de Bartlett suggère qu'il y a une corrélation significative suffisante dans les données pour une analyse factorielle ($\chi^2(66) = 3194.04$, $p < .001$). Ces deux indices ont été calculés avec la fonction `check_factorstructure` du package *parameters*.

Le choix de trois dimensions pour l'analyse était soutenu par cinq (35,71%) méthodes sur quatorze (dont CNG, coordonnées optimales, analyse parallèle, critère de Kaiser, Scree (SE)).⁷. Nous avons donc conduit l'analyse factorielle multiple avec la fonction `factor_analysis`

⁷Nous avons par ailleurs mené une analyse à quatre facteurs, dans la mesure où ce nombre était le deuxième le plus supporté par les indices de détermination : la quatrième dimension identifiée par cette analyse rassemble quasi-exclusivement les scores au Corsi et à l'Empan Verbal, soit les deux tâches de mémoire de travail. Voir la [Figure 6](#) en [Annexes](#). Les 4 facteurs latents ont représenté 67,82% de la variance totale des données originales (MR1 = 25,86%, MR2 = 21,57%, MR3 = 12,91%, MR4 = 7,48%).

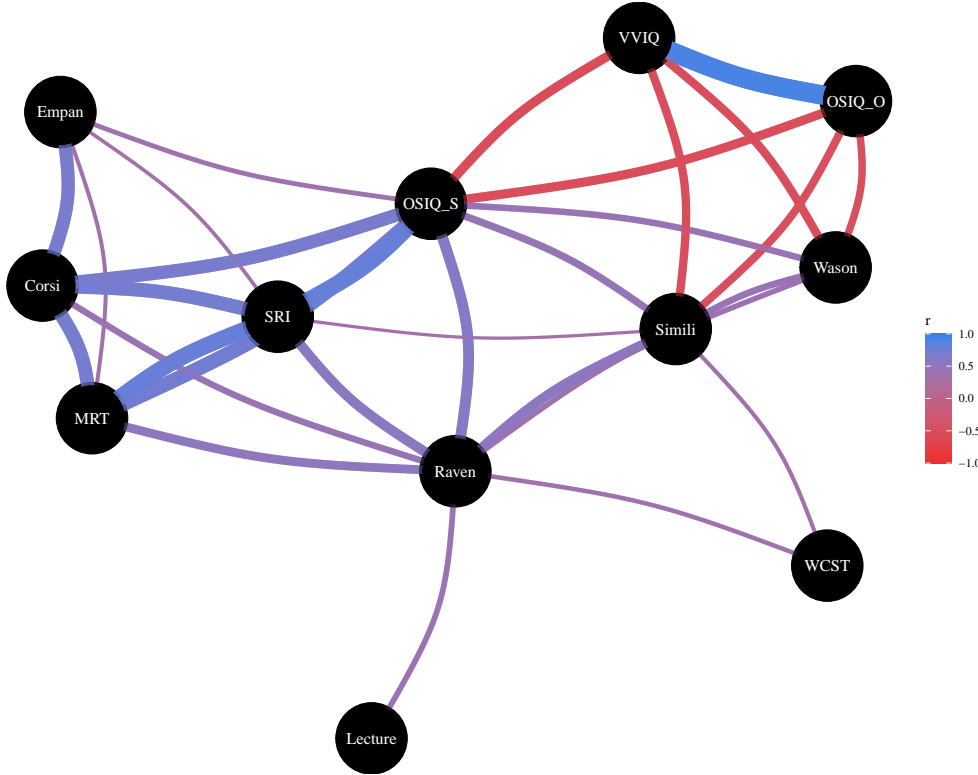


Figure 1: Représentation du GGM ajusté sur nos données. Chaque noeud représente une variable. Les liens bleus dénotent une corrélation positive, les rouges une corrélation négative, et leur épaisseur dépend de la force de cette corrélation. Le modèle illustre les choix de pondération réalisés à l'étape de simulation : on peut notamment voir des corrélations très prononcées entre le VVIQ et l'OSIQ-objet ($r = 0.77$, $p < .001$) qui évaluent tous deux l'imagerie objet, le Digit Span et les blocs de Corsi ($r = 0.68$, $p < .001$) qui évaluent entre autres la mémoire de travail, ou encore entre l'OSIQ-spatial et le SRI, qui sont respectivement l'auto-évaluation et la tâche les plus spécifiques de l'imagerie spatiale.

du package *parameters* sur R, réglée pour trois facteurs et une rotation “clusters”. La [Table 2](#) présente les capacités explicatives de chaque composante sur la variance de totale de l'échantillon. Les 3 facteurs latents ont représenté 62,55% de la variance totale des données originales (MR1 = 26,91%, MR2 = 21,53%, MR3 = 14,11%). La distribution des poids de chaque variable selon les facteurs est présentée en [Figure 2](#).

Parameter	MR1	MR2	MR3
Eigenvalues	4.545	2.000	0.961
Variance	0.269	0.215	0.141
Variance_Cumulative	0.269	0.484	0.626

Parameter	MR1	MR2	MR3
Variance_Proportion	0.430	0.344	0.226

Table 2: Analyses des performances en termes de variance expliquée des facteurs déterminés selon une rotation adaptée à une analyse de clusters.

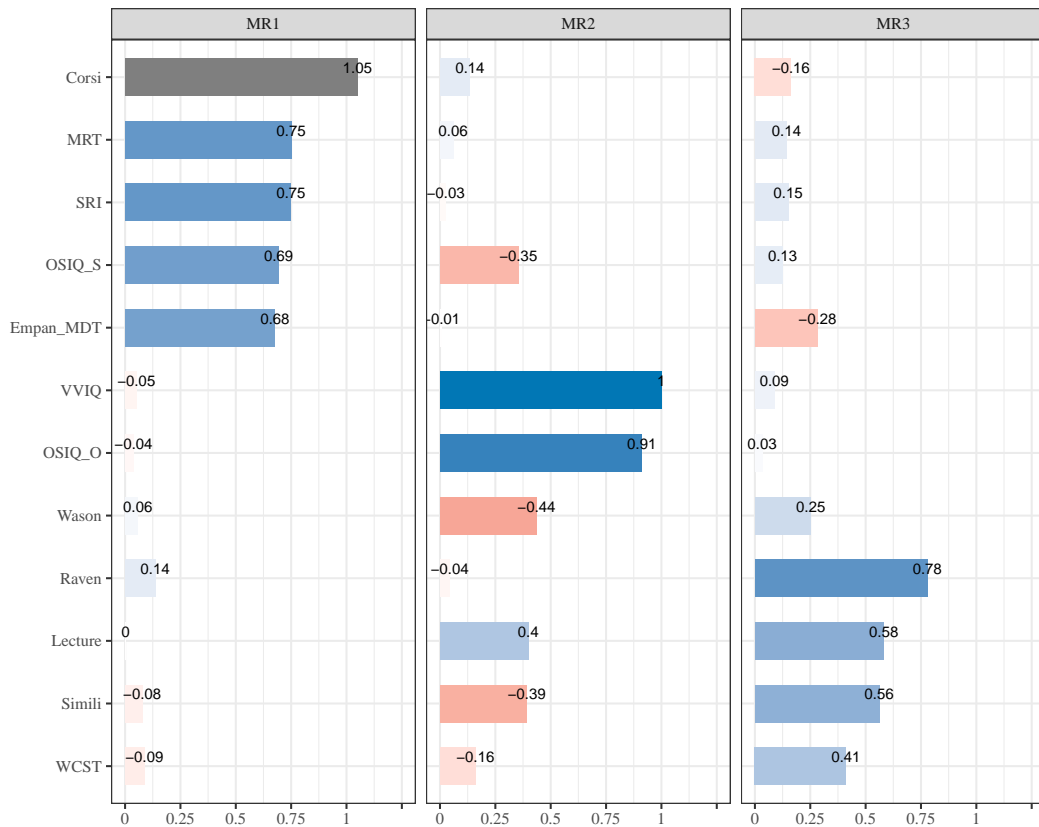


Figure 2: Poids de chaque variable dans l'Analyse Factorielle Multiple à quatre facteurs.

A partir de cette distribution et de l'analyse en graphes de nos facteurs, nous avons catégorisé les trois composantes : la première, la plus corrélée au SRI, au MRT, à l'OSIQ-Spatial et aux blocs de Corsi (toutes des tâches ayant une composante spatiale) sera appelée **Imagerie Spatiale**. La seconde, corrélée au VVIQ, à l'OSIQ-Objet et au Wason, sera l'**Imagerie Objet**. La dernière, corrélée aux Matrices de Raven, aux Similitudes, à la compréhension en lecture et au WCST, sera le **Raisonnement**.

2.6.3 Analyse en *clusters*

Nous avons vérifié si l'ensemble de données était approprié pour le clustering via la statistique H de Hopkins : $H = 0.23$. Si la valeur de la statistique de Hopkins est proche de 0 (inférieure à 0,5), alors nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et conclure que l'ensemble de données est significativement clusterisable. Une valeur de H inférieure à 0,25 indique une tendance au clustering au niveau de confiance de 90% (Lawson & Jurs, 1990).

Le nombre de clusters optimal a été calculé grâce à l'ensemble des indices présents dans le package R NbClus (Charrad et al., 2014). 38% indices (11 sur 29) proposait un nombre optimal de deux clusters pour notre échantillon, reflétant nos connaissances *a priori* et la construction de notre structure de facteurs sur la base dichotomique aphantasiques/non-aphantasiques que nous connaissons. Néanmoins, 27.5% des indices (8 sur 29 - Elbow, Silhouette, Ch, CCC, Cindex, DB, Duda, Pseudot2) soutenaient le choix de 4 clusters. A des fins exploratoires, et pour mettre en évidence l'intérêt potentiel de notre démarche analytique, nous avons décidé de mener nos analyses sur 4 clusters.

Une implémentation de l'algorithme des *k-means* a donc été conduite avec 4 clusters sur l'ensemble de l'échantillon. Comme décrit plus haut, suite au calcul de la matrice de dissimilarité, les observations sont attribuées au cluster le plus probable en termes d'assignation. L'algorithme entier est répété un grand nombre de fois ($n = 200$ ici) avec des "points de départ" - l'endroit d'initialisation des centres des clusters - différents. La partition choisie place chaque participant dans le cluster où il était "majoritairement" sur toutes les répétitions. Le résultat des k-means est représenté dans la Figure 3, et les profils cognitifs associés sur les trois capacités définies par l'AFM est en Figure 4.

Par ailleurs, l'analyse de clusters montre que les quatre clusters expliquent 60,70% de la variance totale des données originales. Nous avons alors mené une analyse comparative avec la solution à deux clusters, qui n'expliqueraient "que" 37,26% de la variance totale des données, s'ajoutant à l'argumentaire de notre choix de quatre clusters.

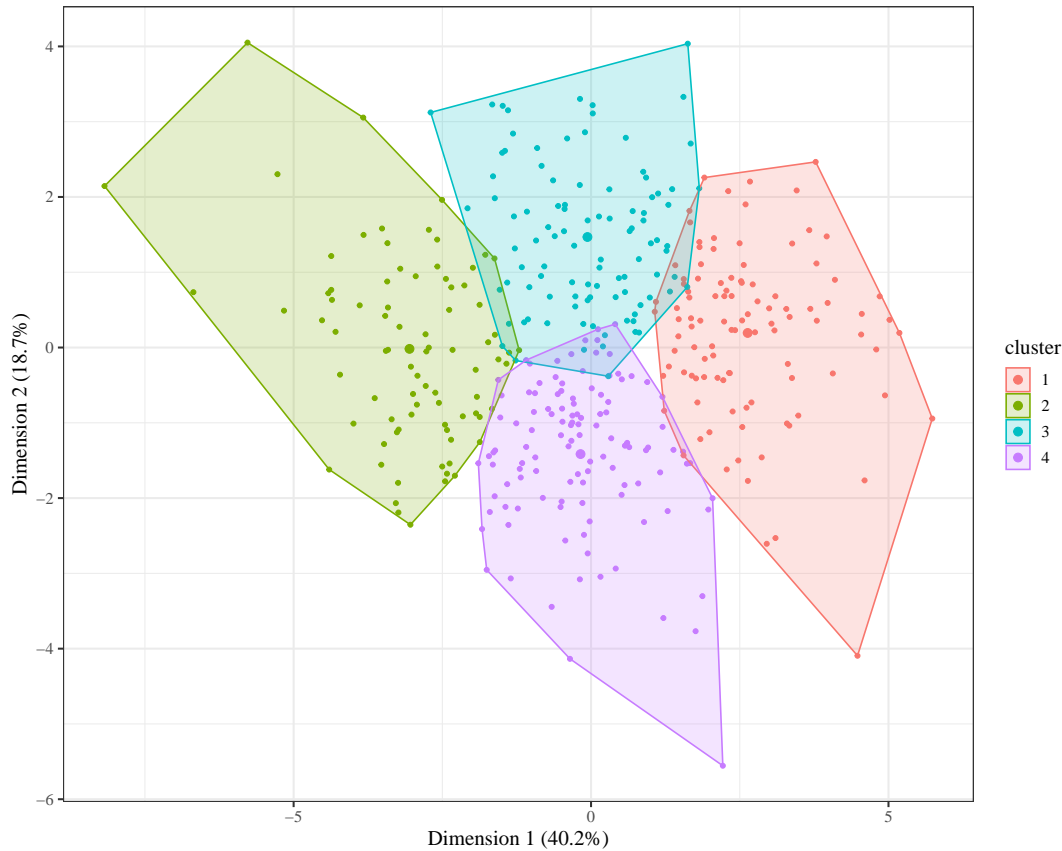


Figure 3: Représentation des clusters reconnus par la méthode des 'k-means', selon les deux composantes principales de l'AFM.

2.6.4 Composition et description des clusters

Les profils ont ensuite été étudiés sur leur composition en fonction du diagnostic initial et sur les compétences cognitives du profil et celles sous-tendant ces performances grâce à des comparaisons de groupes.

La [Table 3](#) présente la répartition dans les nouveaux clusters des participants initialement identifiés comme aphantasiques ou non par le VVIQ. Les clusters 3 et 4 sont représentatifs de l'importance du critère de l'imagerie visuelle-objet : ils sont composés respectivement de 100% de contrôles et de 100% d'aphantasiques. Les clusters 1 et 2 sont néanmoins plus équilibrés.

Dans le but d'interpréter les clusters à partir des scores des compétences les composant, une moyenne en dessous de 0 (moyenne standardisée) est considérée comme déficitaire et une moyenne au-dessus de 0 comme non-déficitaire. Les moyennes de chaque cluster aux variables avec les tailles d'effectif sont présentés dans la [Table 3](#).

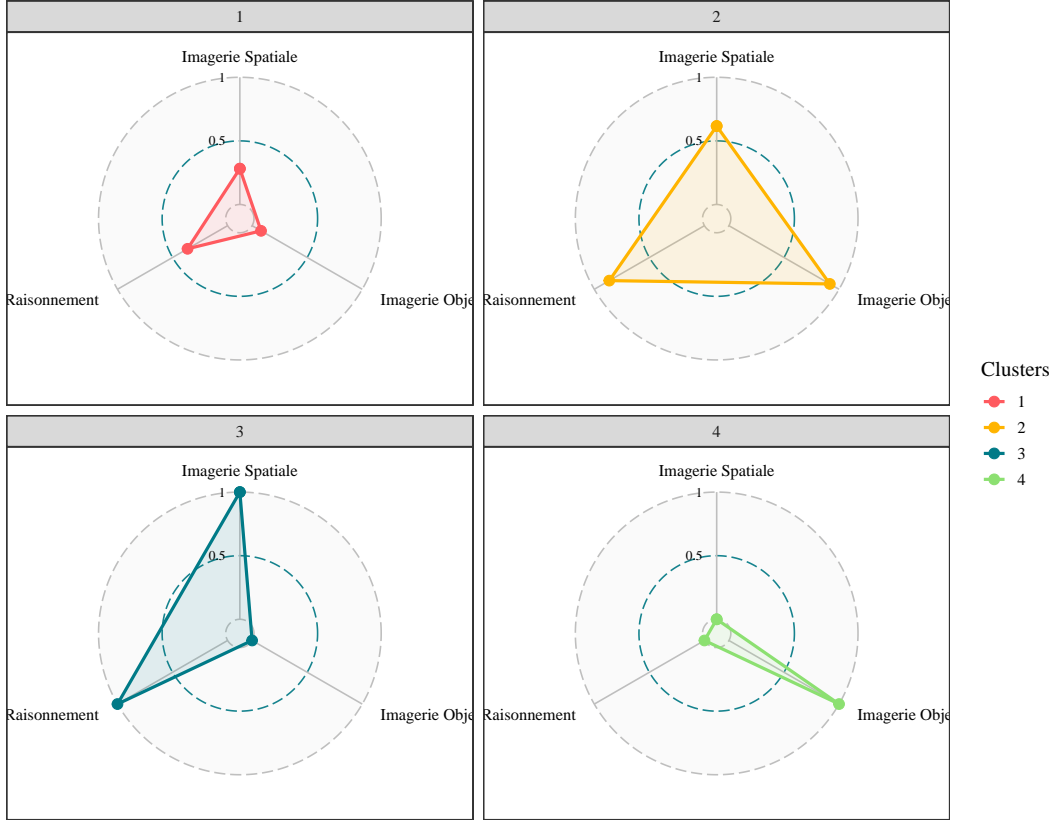


Figure 4: Diagramme représentant les profils cognitifs associés à chaque cluster, selon trois dimensions principales : l'imagerie visuelle-objet, l'imagerie visuo-spatiale et le raisonnement.

Cluster	Imagerie Spatiale	Imagerie Objet	Raisonnement	Aphantasiques	Non-Aphantasiques
1	-0.2435470	-0.7742495	-0.1801197	29	49
2	0.4247462	0.7090962	0.6260035	42	73
3	1.1891565	-0.9185303	0.8451114	126	0
4	-0.8051109	0.8581758	-0.7664169	0	81

Table 3: Moyennes évaluées à chaque compétence et répartition des effectifs par cluster.

Nous pourrions par la suite mener des analyses plus poussées par cluster pour raffiner la description de chaque profil et son fonctionnement (notamment tester des liens potentiels avec les statistiques démographiques), mais celles-ci présenteraient peu d'intérêt dans le cas présent, les données simulées ne représentant personne.

Dans l’objectif de mieux décrire les sous-groupes, nous réaliserons des analyses de variance univariées. Nous avons ajusté des modèles linéaires sur nos données pour prédire les nouveaux scores de *Raisonnement*, d’*Imagerie Objet* et d’*Imagerie Spatiale* en fonction des clusters, et ainsi mieux comparer et caractériser nos sous-groupes. Ces modèles ont permis d’expliquer une part de variance importante et statistiquement significative des scores en Raisonnement ($r^2 = 0.49$, $F(3, 396) = 128.86$, $p < .001$, adj. r^2 ajusté = 0.49), en Imagerie Objet ($r^2 = 0.69$, $F(3, 396) = 290.12$, $p < .001$, r^2 ajusté = 0.68) et en Imagerie Spatiale ($r^2 = 0.56$, $F(3, 396) = 168.39$, $p < .001$, r^2 ajusté = 0.56).

A cette étape, les post-hoc des modèles avec un intercept à 0 nous permettent de retrouver les valeurs de la [Table 3](#). Dans l’analyse effective, nous réaliserions *tendanciellement* ($p = .06$) des post-hocs deux-à-deux plus ciblés avec la correction que nous choisirons : néanmoins dans ces analyses prévisionnelles, tout est extrêmement significatif par construction et ces tests seraient inutilement lourds. La [Figure 5](#) présente les comparaisons des différentes moyennes dans un histogramme de type *Cleveland* (dit *lollipop chart*).

3 Discussion

Le plan d’analyse et les simulations présentées ici ont permis de mettre en évidence l’intérêt dans un premier temps d’une étude dimensionnelle et exploratoire (*data-driven*) des compétences de l’imagerie et de l’abstraction, puis d’une analyse des données des participants partitionnées de façon non-supervisée.

Une analyse exploratoire de l’imagerie mentale.

L’analyse dimensionnelle *data driven* peut mettre en évidence des liens entre des capacités cognitives à partir des données : elle pourrait permettre d’élucider les connections des différentes formes de l’imagerie entre elles et avec les compétences abstraites. Une analyse factorielle puis basée sur la théorie des graphes permettrait de lier les compétences individuelles en des réseaux fonctionnels cohérents dont la proximité ou la distance serait mise en évidence sans interférence des nos hypothèses.

Dans cette simulation (dont la base est bien sûr teintée par toutes les connaissances et

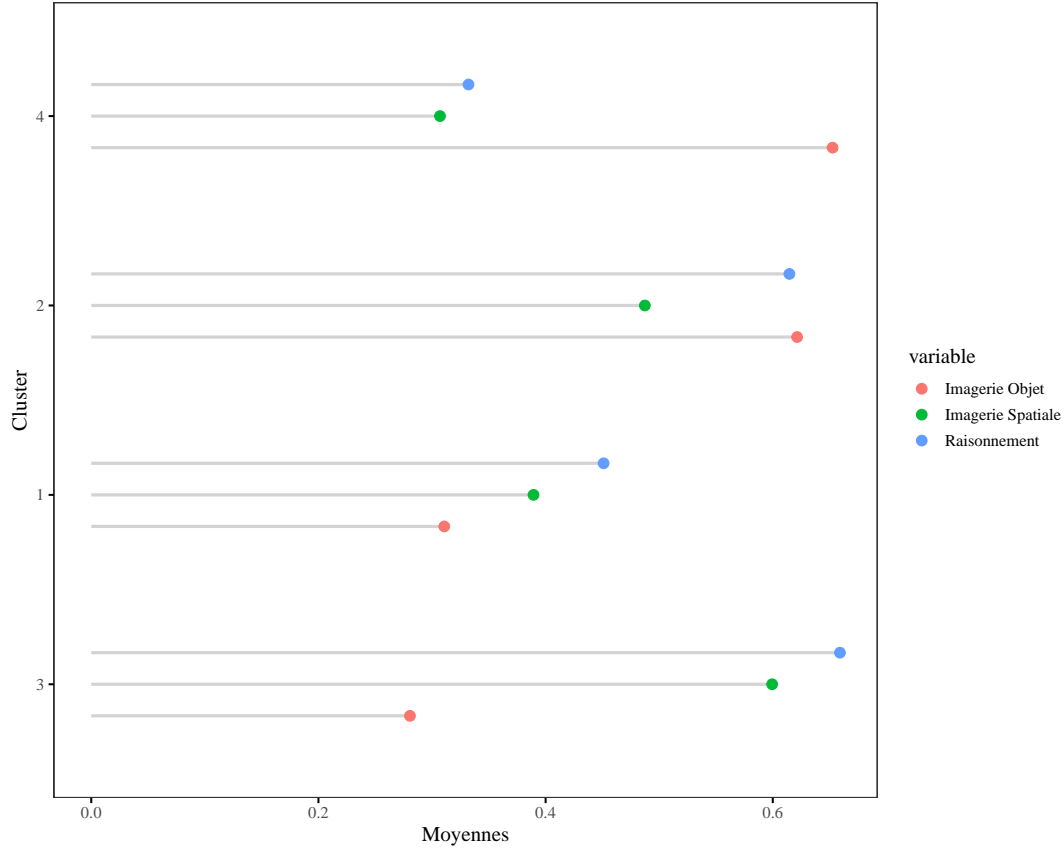


Figure 5: Représentation des moyennes de chaque cluster pour les trois capacités cognitives.

hypothèses *a priori*), l'Analyse Factorielle Multiple a permis de mettre en évidence trois composantes cognitives reflétées par nos facteurs: l'imagerie visuelle-objet, l'imagerie visuospatiale et le raisonnement. La pertinence analytique de la méthode est reflétée par la différence entre notre méthodologie de simulation et le résultat de l'AFM : nous avons initialement simulé douze variables et les avons liées linéairement à cinq facteurs latents, pondération qui était dépendante de nos présupposition sur les facteurs en question. L'AFM en a extrait trois très pertinents, mais avait aussi identifié - dans un quatrième facteur moins impactant - la *mémoire de travail*. L'autre facteur que nous avons construit, la *flexibilité mentale*, a été évacué par l'analyse de facteurs car indiscernable des autres : nos variables étaient toutes plus corrélées à d'autres facteurs qu'à la flexibilité elle-même. L'analyse successive en graphes par un *Gaussian Graphical Model* nous a permis d'observer les distances entre ces réseaux et leur liens réciproques. Sur la base d'une matrice corrélation entre les variables, elle a créé une analyse géométrique du plan de facteurs et une représentation de celui-ci. Cette

représentation a montré sa capacité à révéler des liens entre variables mais aussi entre *réseaux*. Dans notre simulation nous avons par exemple créé intentionnellement⁸ deux phénomènes : une corrélation négative entre l'imagerie visuelle-objet d'un côté et l'imagerie spatiale et le raisonnement de l'autre, ainsi qu'une corrélation positive entre l'imagerie spatiale et le raisonnement. Ces deux phénomènes sont très bien retranscrits par le GGM, illustrant sa pertinence dans de tels modèles de données.

Vers la construction de profils cognitifs des aphantasies

Nos données - illustrant notre recrutement réel potentiel - étaient ici construites sur la base de deux sets de moyennes représentant deux groupes *supposés*, divisés selon un axe d'une seule dimension : le déficit (ou non) d'imagerie visuelle (objet). Cette étude a permis de démontrer la pertinence de l'intervention d'un algorithme de partition non-supervisée (*k-means*) pour redéfinir les groupes - si nécessaire - sur plusieurs dimensions en partant des données elles-mêmes et en s'affranchissant alors de nos connaissances préalables. Nous avons ici illustré une situation potentielle où cette partition résulte en une recommandation de quatre groupes au lieu de deux. Du fait de la construction manuelle des données, ces groupes ont des caractéristiques exagérées. Néanmoins nous pouvons dégager le sens de la partition réalisée par l'algorithme (voir [Figure 4](#)). Il existe deux groupes performants en raisonnement : un groupe performant à toutes les compétences (le cluster 2), composé majoritairement de non-aphantasiques - ceux-ci représentent les contrôles moyens et les aphantasiques "indiscernables". Il existe ensuite un groupe - le cluster 3 - très faible en imagerie objet mais encore davantage performant en raisonnement et imagerie spatiale, composé uniquement d'aphantasiques : il reflète les aphantasiques de "haut niveau" et illustre l'équilibre potentiellement avantageux des stratégies alternatives des aphantasiques⁹. Le cluster 1 est mixte mais composé majoritairement de non-aphantasiques, et représente la moyenne basse des "compétences équilibrées" et des aphantasiques "indiscernables". Enfin le cluster 4, composé uniquement de non-aphantasiques, présente des moyennes très basses sauf en imagerie-objet, où il présente la moyenne la plus élevée : ce serait ici nos "hyperphantasiques".

⁸Ces phénomènes n'existaient que de façon sous-jacente à nos coefficients du modèle factoriel, i.e. dans notre modèle d'*effets*.

⁹Ce serait ici notre groupe "*aphantasiques scientifiques*".

Nous avons donc établi avec ce dossier, notre simulation et nos analyses prévisionnelles, qu'un tel plan d'étude et d'analyse basé sur des méthodes non-supervisées et *data-driven* semble prometteur et fécond : ce plan sera potentiellement mis en application dès le deuxième trimestre 2023 dans l'étude réelle.

Références

- Allaire, J. (2022). *Quarto: R Interface to Quarto Markdown Publishing System* [Manual]. <https://github.com/quarto-dev/quarto-r>
- Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J., Luraschi, J., Ushey, K., Atkins, A., Wickham, H., Cheng, J., Chang, W., & Iannone, R. (2023). *Rmarkdown: Dynamic Documents for R* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=rmarkdown>
- Anderson, D., Heiss, A., & Sumners, J. (2022). *Equatomatic: Transform Models into LaTeX Equations* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=equatomatic>
- Bainbridge, W. A., Pounder, Z., Eardley, A. F., & Baker, C. I. (2021). Quantifying Aphantasia through Drawing: Those without Visual Imagery Show Deficits in Object but Not Spatial Memory. *Cortex*, 135, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.11.014>
- Bartolomeo, P., Hajhajate, D., Liu, J., & Spagna, A. (2020). Assessing the Causal Role of Early Visual Areas in Visual Mental Imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, 21(9, 9), 517-517. <https://doi.org/10.1038/s41583-020-0348-5>
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2022). *Lme4: Linear Mixed-Effects Models Using Eigen and S4* [Manual]. <https://github.com/lme4/lme4/>
- Bates, D., Maechler, M., & Jagan, M. (2022). *Matrix: Sparse and Dense Matrix Classes and Methods* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=Matrix>
- Ben-Shachar, M. S., Makowski, D., Lüdtke, D., Patil, I., Wiernik, B. M., & Th'eriault, R. (2023). *Effectsize: Indices of Effect Size* [Manual]. <https://easystats.github.io/effectsize/>
- Bhushan, N., Mohnert, F., Sloot, D., Jans, L., Albers, C., & Steg, L. (2019). Using a Gaussian Graphical Model to Explore Relationships Between Items and Variables in Environmental Psychology Research. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.01050>
- Bilker, W. B., Hansen, J. A., Brensinger, C. M., Richard, J., Gur, R. E., & Gur, R. C. (2012). Development of Abbreviated Nine-Item Forms of the Raven's Standard Progressive Matrices Test. *Assessment*, 19(3), 354-369. <https://doi.org/10.1177/1073191112446655>
- Bion, R. (2023). *Ggradar: Create Radar Charts Using Ggplot2* [Manual].

- Blajenkova, O., Kozhevnikov, M., & Motes, M. A. (2006a). Object and Spatial Imagery: Distinctions between Members of Different Professions. *Cognitive Processing*, 7(1), 20-21. <https://doi.org/10.1007/s10339-006-0047-9>
- Blajenkova, O., Kozhevnikov, M., & Motes, M. A. (2006b). Object-Spatial Imagery: A New Self-Report Imagery Questionnaire. *Applied Cognitive Psychology*, 20(2), 239-263. <https://doi.org/10.1002/acp.1182>
- Blazhenkova, O., & Kozhevnikov, M. (2010). Visual-Object Ability: A New Dimension of Non-Verbal Intelligence. *Cognition*, 117(3), 276-301. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.08.021>
- Blazhenkova, O., & Kozhevnikov, M. (2009). The New Object-Spatial-Verbal Cognitive Style Model: Theory and Measurement. *Applied Cognitive Psychology*, 23(5), 638-663. <https://doi.org/10.1002/acp.1473>
- Blomkvist, A. (2022). Aphantasia: In Search of a Theory. *Mind & Language*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1111/mila.12432>
- Brewer, W. F., & Schommer-Aikins, M. (2006). Scientists Are Not Deficient in Mental Imagery: Galton Revised. *Review of General Psychology*, 10(2), 130-146. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.10.2.130>
- Cavedon-Taylor, D. (2021). *Predictive Processing and Perception: What Does Imagining Have to Do with It?* 15.
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of statistical software*, 61, 1-36.
- Coleman, S. L., & Gotch, A. J. (1998). Spatial Perception Skills of Chemistry Students. *Journal of Chemical Education*, 75(2), 206. <https://doi.org/10.1021/ed075p206>
- Crowder, A. (2018). *Differences in Spatial Visualization Ability and Vividness of Spatial Imagery Between People With and Without Aphantasia*.
- Csardi, G., & Nepusz, T. (2006). The Igraph Software Package for Complex Network Research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695. <https://igraph.org>
- Dance, C. (2022, janvier 26). *Less Sensory Overwhelm In Aphantasia: A Potential Advantage?* <https://aphantasia.com/sensory-overwhelm/>

- Dance, C. J., Ipser, A., & Simner, J. (2022). The Prevalence of Aphantasia (Imagery Weakness) in the General Population. *Consciousness and Cognition*, 97, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2021.103243>
- Dance, C. J., Ward, J., & Simner, J. (2021). What Is the Link Between Mental Imagery and Sensory Sensitivity? Insights from Aphantasia. *Perception*, 50(9), 757-782. <https://doi.org/10.1177/03010066211042186>
- Dawes, A. (2022). *Inner Visions of the Mind's Eye: The Role of Visual Imagery in Remembering the Past and Imagining the Future* [UNSW Sydney]. <https://doi.org/10.26190/UNSWORKS/24158>
- 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(1, 1), 10022. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65705-7>
- Dervieux, C. (2022). *Pandoc: Manage and Run Universal Converter Pandoc from R* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=pandoc>
- Farah, M. J., Levine, D. N., & Calvanio, R. (1988). A Case Study of Mental Imagery Deficit. *Brain and Cognition*, 8(2), 147-164. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(88\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0278-2626(88)90046-2)
- Faw, B. (2009). *Conflicting Intuitions May Be Based On Differing Abilities*. 25.
- Fox-Muraton, M. (2021). A World without Imagination? Consequences of Aphantasia for an Existential Account of Self. *History of European Ideas*, 47(3), 414-428. <https://doi.org/10.1080/01916599.2020.1799553>
- Galton, F. (1880). I.—STATISTICS OF MENTAL IMAGERY. *Mind*, os-V(19), 301-318. <https://doi.org/10.1093/mind/os-V.19.301>
- Ganczarek, J., Żurawska-Żyła, R., & Rolek, A. (2020). « *I remember things, but I can't picture them.* » *What can a case of aphantasia tell us about imagery and memory?* 20(2), 134-141. <https://doi.org/10.15557/PiPK.2020.0018>
- Gibeau, R.-M. (2021). The Corsi Blocks Task: Variations and Coding with jsPsych. *The Quantitative Methods for Psychology*, 17(3), 299-311. <https://doi.org/10.20982/tqmp.17.3.p299>
- Greenberg, D. L., & Knowlton, B. J. (2014). The Role of Visual Imagery in Autobiographical Memory. *Memory & Cognition*, 42(6), 922-934. <https://doi.org/10.3758/s13421-014-0402-5>

- Groeger, J. A., Field, D., & Hammond, S. M. (1999). Measuring Memory Span. *International Journal of Psychology*, 34(5-6), 359-363. <https://doi.org/10.1080/002075999399693>
- Heaton, R. K., & Par, S. (2000). WCST-64: Computer Version 2. *PAR Psychological Assessment Resources*, Lutz, FL.
- Hegarty, M., & Waller, D. A. (2005). Individual Differences in Spatial Abilities. In *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (p. 121-169). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610448.005>
- Henry, L., & Wickham, H. (2022). *Purrr: Functional Programming Tools* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=purrr>
- JUNICHI, T., & JIRO, G. (2020). A Preliminary Single-Case Study of Aphantasia in Japan. *Tohoku Psychological Folia*, 79, 26-32.
- Kassambara, A. (2022a). *Ggpubr: Ggplot2 Based Publication Ready Plots* [Manual]. <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>
- Kassambara, A. (2022b). *Rstatix: Pipe-friendly Framework for Basic Statistical Tests* [Manual]. <https://rpkgs.datanovia.com/rstatix/>
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses* [Manual]. <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>
- Keehner, M. M., Tendick, F., Meng, M. V., Anwar, H. P., Hegarty, M., Stoller, M. L., & Duh, Q.-Y. (2004). Spatial Ability, Experience, and Skill in Laparoscopic Surgery. *The American Journal of Surgery*, 188(1), 71-75. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2003.12.059>
- Kendle, A. (2017). *Aphantasia: Experiences, Perceptions, and Insights*. Dark River.
- 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>
- Keogh, R., & Pearson, J. (2020). Attention Driven Phantom Vision: Measuring the Sensory Strength of Attentional Templates and Their Relation to Visual Mental Imagery and Aphantasia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1817), 20190688. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0688>
- Keogh, R., Wicken, M., & Pearson, J. (2021). Visual Working Memory in Aphantasia: Retained Accuracy and Capacity with a Different Strategy. *Cortex*, 143, 237-253. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.07.012>

- Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2002). Visual Imagery Can Impede Reasoning. *Memory & Cognition*, 30(3), 363-371. <https://doi.org/10.3758/BF03194937>
- Knight, K. F., Milton, F. N., Milton, F. N., Zeman, A., & Zeman, A. (2022). *Memory without Imagery: No Evidence of Visual Working Memory Impairment in People with Aphantasia*. 8.
- Kosslyn, S. M., Behrmann, M., & Jeannerod, M. (1995). The Cognitive Neuroscience of Mental Imagery. *Neuropsychologia*, 33(11), 1335-1344. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00067-D](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00067-D)
- Kothe, E., Callegher, C. Z., Gambarota, F., Linkersdörfer, J., & Ling, M. (2021). *Trackdown: Collaborative Writing and Editing of R Markdown (or Sweave) Documents in Google Drive*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5167320>
- Kozhevnikov, M., Blazhenkova, O., & Becker, M. (2010). Trade-off in Object versus Spatial Visualization Abilities: Restriction in the Development of Visual-Processing Resources. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(1), 29-35. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.1.29>
- Kozhevnikov, M., Kosslyn, S., & Shephard, J. (2005). Spatial versus Object Visualizers: A New Characterization of Visual Cognitive Style. *Memory & Cognition*, 33(4), 710-726. <https://doi.org/10.3758/BF03195337>
- Kozhevnikov, M., Kozhevnikov, M., Yu, C. J., & Blazhenkova, O. (2013). Creativity, Visualization Abilities, and Visual Cognitive Style. *British Journal of Educational Psychology*, 83(2), 196-209. <https://doi.org/10.1111/bjep.12013>
- Kozhevnikov, M., Motes, M. A., & Hegarty, M. (2007). Spatial Visualization in Physics Problem Solving. *Cognitive Science*, 31(4), 549-579. <https://doi.org/10.1080/15326900701399897>
- Kuhn, M., Jackson, S., & Cimentada, J. (2022). *Corrr: Correlations in R* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=corrr>
- Kuznetsova, A., Bruun Brockhoff, P., & Haubo Bojesen Christensen, R. (2020). *lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models* [Manual]. <https://github.com/runehaubo/lmerTestR>
- Lachlan, K., Keogh, R., Andrillion, T., & Pearson, J. (2022, mars 31). *The Pupillary Light Response as a Physiological Index of Aphantasia, Sensory and Phenomenological Imagery Strength* / eLife. <https://elifesciences.org/articles/72484>

- Lange, K., Kühn, S., & Filevich, E. (2015). Just Another Tool for Online Studies” (JATOS): An Easy Solution for Setup and Management of Web Servers Supporting Online Studies. *PLOS ONE*, 10(6), e0130834. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130834>
- Lawrence, M. A. (2016). *Ez: Easy Analysis and Visualization of Factorial Experiments* [Manual]. <http://github.com/mike-lawrence/ez>
- Lawson, R. G., & Jurs, P. C. (1990). New Index for Clustering Tendency and Its Application to Chemical Problems. *Journal of chemical information and computer sciences*, 30(1), 36-41.
- Lüdecke, D., Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., & Wiernik, B. M. (2022). *Easystats: Framework for Easy Statistical Modeling, Visualization, and Reporting* [Manual]. <https://easystats.github.io/easystats/>
- Lüdecke, D., Makowski, D., Patil, I., Waggoner, P., Ben-Shachar, M. S., Wiernik, B. M., & Arel-Bundock, V. (2023). *Insight: Easy Access to Model Information for Various Model Objects* [Manual]. <https://easystats.github.io/insight/>
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., & Hubert, M. (2022). *Cluster: "Finding Groups in Data": Cluster Analysis Extended Rousseeuw et Al.* [Manual]. <https://svn.r-project.org/R-packages/trunk/cluster/>
- Makowski, D., Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., & Patil, I. (2023). *Modelbased: Estimation of Model-Based Predictions, Contrasts and Means* [Manual]. <https://easystats.github.io/modelbased/>
- Makowski, D., Wiernik, B. M., Patil, I., Lüdecke, D., & Ben-Shachar, M. S. (2022). *Correlation: Methods for Correlation Analysis* [Manual]. <https://easystats.github.io/correlation/>
- Marks, D. F. (1973). Vividness of Visual Imagery Questionnaire. *Journal of Mental Imagery*.
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An Open-Source, Graphical Experiment Builder for the Social Sciences. *Behavior Research Methods*, 44(2), 314-324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- Milton, F., Fulford, J., Dance, C., Gaddum, J., Heuerman-Williamson, B., Jones, K., Knight, K. F., MacKisack, M., Winlove, C., & Zeman, A. (2021). Behavioral and Neural Signatures of Visual Imagery Vividness Extremes: Aphantasia versus Hyperphantasia. *Cerebral Cortex Communications*, 2(2), tgab035. <https://doi.org/10.1093/texcom/tgab035>

- Monzel, M., Mitchell, D., Macpherson, F., Pearson, J., & Zeman, A. (2022). Aphantasia, Dysikonesia, Anauralia: Call for a Single Term for the Lack of Mental Imagery—Commentary on Dance et al. (2021) and Hinwar and Lambert (2021). *Cortex*, 150, 149-152. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.02.002>
- Orion, N., Ben-Chaim, D., & Kali, Y. (1997). Relationship Between Earth-Science Education and Spatial Visualization. *Journal of Geoscience Education*, 45(2), 129-132. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-45.2.129>
- Palermo, L., Boccia, M., Piccardi, L., & Nori, R. (2022). Congenital Lack and Extraordinary Ability in Object and Spatial Imagery: An Investigation on Sub-Types of Aphantasia and Hyperphantasia. *Consciousness and Cognition*, 103, 103360. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2022.103360>
- Patil, I., Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Wiernik, B. M., Bacher, E., & Lüdecke, D. (2022). datawizard: An R Package for Easy Data Preparation and Statistical Transformations. *Journal of Open Source Software*, 7(78), 4684. <https://doi.org/10.21105/joss.04684>
- Pearson, J. (2019). The Human Imagination: The Cognitive Neuroscience of Visual Mental Imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, 20(10, 10), 624-634. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0202-9>
- Pedersen, T. L. (2022). *Ggraph: An Implementation of Grammar of Graphics for Graphs and Networks* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=ggraph>
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A Redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test - Different Versions and Factors That Affect Performance. *Brain and Cognition*, 28(1), 39-58. <https://doi.org/10.1006/brcg.1995.1032>
- Posit team. (2022). *RStudio: Integrated Development Environment for R* [Manual]. Posit Software, PBC. <http://www.posit.co/>
- Pounder, Z., Jacob, J., Evans, S., Loveday, C., Eardley, A. F., & Silvanto, J. (2022). Only Minimal Differences between Individuals with Congenital Aphantasia and Those with Typical Imagery on Neuropsychological Tasks That Involve Imagery. *Cortex*, 148, 180-192. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.12.010>

- Pylyshyn, Z. W. (2002). Mental Imagery: In Search of a Theory. *Behavioral and Brain Sciences*, 25(2), 157-182. <https://doi.org/10.1017/S0140525X02000043>
- Quintans, D. (2021). *Librarian: Install, Update, Load Packages from CRAN, GitHub, and Bioconductor in One Step* [Manual]. <https://github.com/DesiQuintans/librarian>
- R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Manual]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramful, A., Lowrie, T., & Logan, T. (2017). Measurement of Spatial Ability: Construction and Validation of the Spatial Reasoning Instrument for Middle School Students. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 35(7), 709-727. <https://doi.org/10.1177/0734282916659207>
- Raven, J. C., & Court, J. H. (1938). *Raven's Progressive Matrices*. Western Psychological Services Los Angeles.
- Reisberg, D., Pearson, D. G., & Kosslyn, S. M. (2002). 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>
- Ripley, B. (2022). *MASS: Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS* [Manual]. <http://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>
- Salway, A. F. S., & Logie, R. H. (1995). Visuospatial Working Memory, Movement Control and Executive Demands. *British Journal of Psychology*, 86(2), 253-269. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1995.tb02560.x>
- Schloerke, B., Cook, D., Larmarange, J., Briatte, F., Marbach, M., Thoen, E., Elberg, A., & Crowley, J. (2021). *GGally: Extension to Ggplot2* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=GGally>
- Schraw, G., & Dennison, R. S. (1994). Assessing Metacognitive Awareness. *Contemporary Educational Psychology*, 19(4), 460-475. <https://doi.org/10.1006/ceps.1994.1033>
- Spagna, A. (2022). Chapter 8 - Visual Mental Imagery: Inside the Mind's Eyes. In G. Miceli, P. Bartolomeo, & V. Navarro (Éds.), *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 187, p. 145-160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823493-8.00010-9>
- Suggate, S., & Lenhard, W. (2022). Mental Imagery Skill Predicts Adults' Reading Performance. *Learning and Instruction*, 80, 101633. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2022.101633>

- Takahashi, J., Saito, G., Omura, K., Yasunaga, D., Sugimura, S., Sakamoto, S., Horikawa, T., & Gyoba, J. (2022). *Diversity of Aphantasia Revealed by Multiple Assessments of the Capability for Multi-Sensory Imagery*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/pucsm>
- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial Ability for STEM Domains: Aligning over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance. *Journal of Educational Psychology*, 101, 817-835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wason, P. C. (1968). Reasoning about a Rule. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(3), 273-281. <https://doi.org/10.1080/14640746808400161>
- Watkins, N. W. (2018). (A)Phantasia and Severely Deficient Autobiographical Memory: Scientific and Personal Perspectives. *Cortex*, 105, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.10.010>
- Wechsler, D., Coalson, D. L., & Raiford, S. E. (2008). *Wechsler Adult Intelligence Scale (Technical and Interpretive Manual 4th Ed.)*. San Antonio: NCS Pearson. Inc.
- Wickham, H. (2022a). *Forcats: Tools for Working with Categorical Variables (Factors)* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=forcats>
- Wickham, H. (2022b). *Tidyverse: Easily Install and Load the Tidyverse* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2022). *Dplyr: A Grammar of Data Manipulation* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wickham, H., & Girlich, M. (2022). *Tidyr: Tidy Messy Data* [Manual]. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>
- Xie, Y. (2014). Knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. In V. Stodden, F. Leisch, & R. D. Peng (Éds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman and Hall/CRC.
- Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and Knitr*. Chapman and Hall/CRC.

- Xie, Y. (2023). *Knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R* [Manual]. <https://yihui.org/knitr/>
- Zago, S., Allegri, N., Cristoffanini, M., Ferrucci, R., Porta, M., & Priori, A. (2011). Is the Charcot and Bernard Case (1883) of Loss of Visual Imagery Really Based on Neurological Impairment? *Cognitive Neuropsychiatry*, 16(6), 481-504. <https://doi.org/10.1080/13546805.2011.556024>
- Zeman, A. Z. J., Della Sala, S., Torrens, L. A., Gountouna, V.-E., McGonigle, D. J., & Logie, R. H. (2010). Loss of Imagery Phenomenology with Intact Visuo-Spatial Task Performance: A Case of « Blind Imagination ». *Neuropsychologia*, 48(1), 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.024>
- Zeman, A., Dewar, M., & Della Sala, S. (2015). Lives without Imagery – Congenital Aphantasia. *Cortex*, 73, 378-380. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.05.019>
- Zeman, A., Milton, F., Della Sala, S., Dewar, M., Frayling, T., Gaddum, J., Hattersley, A., Heuerman-Williamson, B., Jones, K., MacKisack, M., & Winlove, C. (2020). Phantasia—The Psychological Significance of Lifelong Visual Imagery Vividness Extremes. *Cortex*, 130, 426-440. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.04.003>
- Zhao, B., Della Sala, S., Zeman, A., & Gherri, E. (2022). Spatial Transformation in Mental Rotation Tasks in Aphantasia. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(6), 2096-2107. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02126-9>
- Zimmer, C. (2010, mars 23). *The Brain: Look Deep Into the Mind's Eye*. Discover Magazine. <https://www.discovermagazine.com/mind/the-brain-look-deep-into-the-minds-eye>

Annexes

Ce manuscrit a été rédigé avec R Markdown¹⁰ (Allaire et al., 2023), Pandoc¹¹ (Dervieux, 2022), Quarto¹² (Allaire, 2022) et en L^AT_EX, médiés par le package *knitr* (Xie, 2014, 2015, 2023), dans l’Environnement de Développement Intégré (IDE) RStudio¹³ (Posit team, 2022). Il a été partagé entre collaborateurs à l’aide de *GitHub*¹⁴, de Google Docs et du package *trackdown* (Kothe et al., 2021). Le code complet de ce manuscrit, de la simulation, des figures, tables et analyses est accessible dans *le dossier de ce projet sur GitHub*¹⁵.

La préparation du code, la simulation, les figures, tables et analyses ont nécessité les packages *cluster* (Maechler et al., 2022), *correlation* (Makowski et al., 2022), *corrr* (Kuhn et al., 2022), *datawizard* (Patil et al., 2022), *dplyr* (Wickham et al., 2022), *easystats* (Lüdecke et al., 2022), *effectsize* (Ben-Shachar et al., 2023), *equationomatic* (Anderson et al., 2022), *ez* (Lawrence, 2016), *factoextra* (Kassambara & Mundt, 2020), *forcats* (Wickham, 2022a), *GGally* (Schloerke et al., 2021), *ggpubr* (Kassambara, 2022a), *ggradar* (Bion, 2023), *ggraph* (Pedersen, 2022), *igraph* (Csardi & Nepusz, 2006), *insight* (Lüdecke et al., 2023), *librarian* (Quintans, 2021), *lme4* (Bates, Maechler, Bolker, et al., 2022), *lmerTest* (Kuznetsova et al., 2020), *MASS* (Ripley, 2022), *Matrix* (Bates, Maechler, & Jagan, 2022), *modelbased* (Makowski et al., 2023), *purrr* (Henry & Wickham, 2022), *rstatix* (Kassambara, 2022b), *tidyr* (Wickham & Girlich, 2022), et *tidyverse* (Wickham et al., 2019; Wickham, 2022b).

¹⁰<https://rmarkdown.rstudio.com>

¹¹<https://pandoc.org/>

¹²<https://quarto.org/>

¹³<https://posit.co/>

¹⁴<https://github.com/>

¹⁵https://github.com/m-delem/aphantasia_project.git

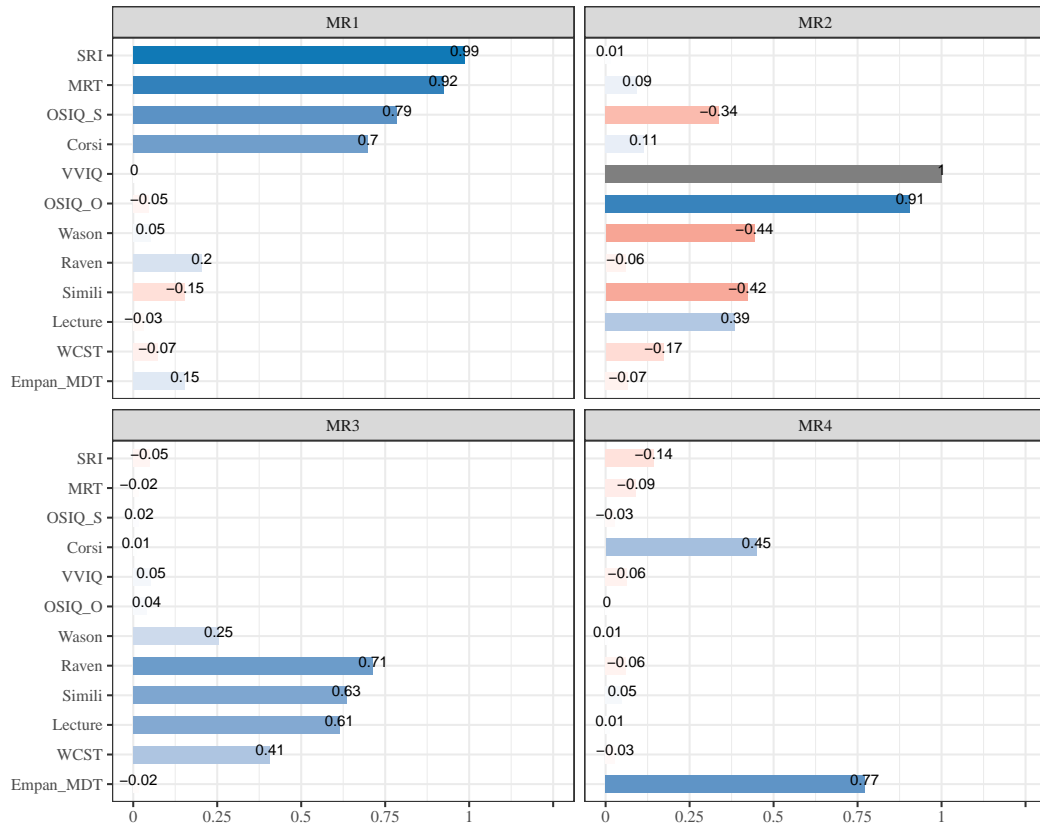


Figure 6: Rotated loadings from factor analysis.

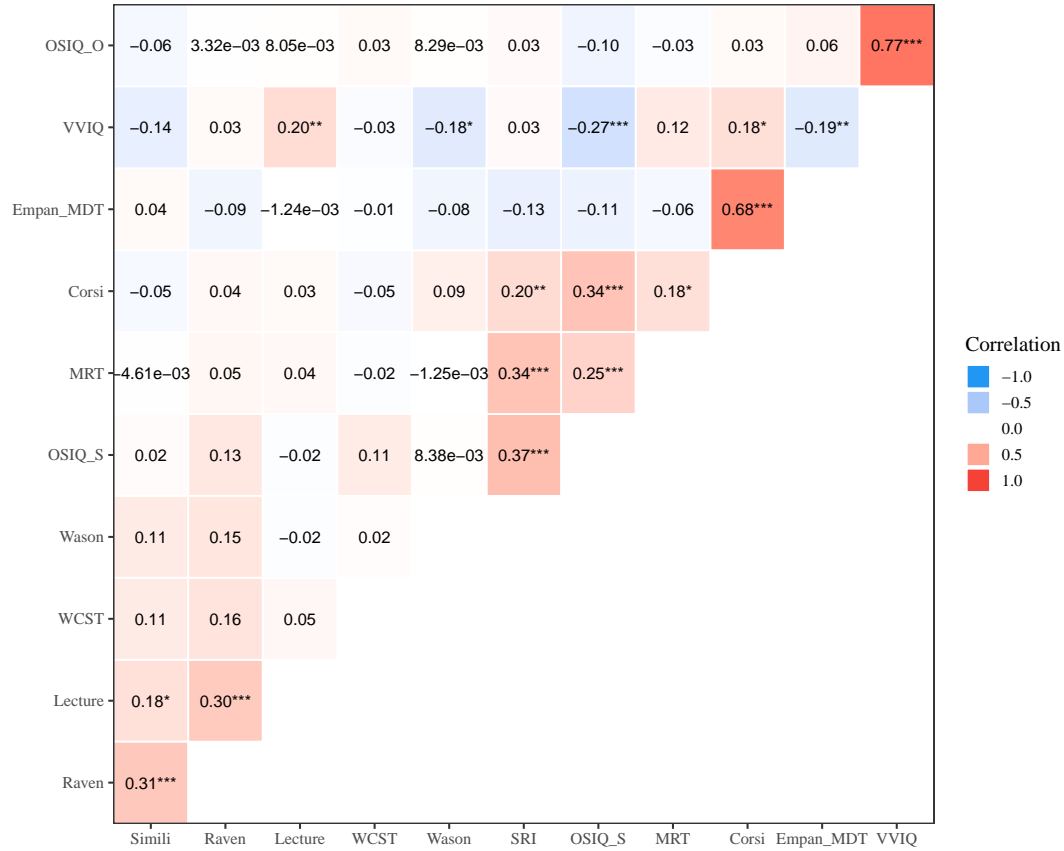


Figure 7: Matrice de corrélation entre toutes les variables mesurées.