

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



12/02/2023

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Imagerie visuelle et aphantasie	3
1.2	Les corrélats de l'aphantasie	4
1.2.1	Corrélats cognitifs	5
1.2.2	Corrélats comportementaux et physiologiques	5
1.2.3	L'aphantasie est elle un trouble ?	6
1.2.4	Expériences de vie et "styles cognitifs"	7
1.3	La distinction entre imagerie visuelle-objet et visuospatiale	8
1.3.1	Voies ventrales et dorsales dans la perception et l'imagerie visuelle . .	9
1.3.2	L'imagerie objet et spatiale chez les aphantasiques	9
1.3.3	Des styles cognitifs équilibrés entre imagerie objet et spatiale	11
1.3.4	Un "trade-off" entre imagerie objet et spatiale chez les aphantasiques ?	12
2	Expérience	14
2.1	Méthode	14
2.1.1	Participants	14
2.1.2	Matériel expérimental	14
2.1.2.1	Questionnaires	14
2.1.3	Equipement	15
2.1.4	Procédure expérimentale	15
2.1.5	Analyses	15
2.2	Variables et hypothèses	15
2.2.1	Variables indépendantes	15
2.2.2	Variables dépendantes	15
2.2.3	Hypothèses opérationnelles	15
2.3	Résultats	15
2.3.1	Différences de moyenne des deux groupes	15
2.3.2	Corrélations entre les variables mesurées	15
2.3.3	Analyses des groupes par partition non-supervisée	16
2.3.4	Analyse des clusters	19
2.3.5	Différences entre les groupes identifiés	22
3	Discussion	23
	Références	24
	Annexes	30

Test pour référencer une figure, ici la Figure 1, ou encore la Figure 4.

Test d’affichage de l’équation d’un modèle hyper stylé qu’on va construire :

$$\text{mpg} = \alpha + \beta_1(\text{cyl}) + \beta_2(\text{disp}) + \epsilon \quad (1)$$

Ou encore de l’équation de la transformation des scores qu’ont utilisé Dawes et al. (2022) :

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

... C’est magnifique. Et est qu’il y aurait moyen de faire une mention du modèle hyper-stylé

1 ? Oui

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'évènements 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.

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 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 état, 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 extension excessive de son observation de quelques répondants particulièrement inhabituels parmi ses collègues scientifiques (Brewer & Schommer-Aikins, 2006), son récit reste intéressant d'un point de vue opposé : 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 La distinction entre imagerie visuelle-objet et visuospatiale

Une hypothèse est que cette dualité 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 (c'est-à-dire la représentation mentale des emplacements spatiaux et des relations entre les parties d'un objet).

1.3.1 Voies ventrales et dorsales dans la perception et l'imagerie visuelle

La distinction entre le traitement des objets et le traitement spatial a d'abord été introduite pour la perception visuelle (Mishkin & Ungerleider, 1982), puis proposée pour la mémoire de travail visuelle (Della Sala et al., 1999; Salway & Logie, 1995). Il a été démontré que le traitement visuel de plus haut niveau est divisé en deux voies distinctes sur le plan fonctionnel et anatomique : la voie ventrale, qui va du lobe occipital au lobe temporal inférieur et qui traite les propriétés des objets (couleurs, forme, luminosité), et la voie dorsale, qui va du lobe occipital au lobe pariétal postérieur et qui traite les propriétés spatiales. Sur la base de données comportementales, neuropsychologiques et de neuroimagerie (Blajenkova et al., 2006b; Boccia et al., 2015; Kozhevnikov et al., 2005, 2002; Morton & Morris, 1995; Palermo et al., 2022), une distinction objet-spatial similaire a été suggérée pour l'imagerie visuelle. Ce contexte théorique a conduit au développement et à la validation d'un questionnaire permettant d'évaluer ces deux aspects de l'imagerie visuelle, l'Object and Spatial Imagery Questionnaire (OSIQ : Blajenkova et al. (2006b)).

1.3.2 L'imagerie objet et spatiale chez les aphantasiques

Dans ce cadre, cette distinction entre imagerie objet et imagerie spatiale pourrait être centrale pour la compréhension de l'aphantasie : les cas étudiés jusqu'à présent sont-ils dépourvus d'imagerie visuelle objet, spatiale ou les deux ? Un résultat expérimental remarquablement 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. Zeman et al. (2020) rapportent que, lorsqu'on leur demande d'imaginer et de compter les fenêtres de leur maison, les personnes ayant une imagerie élevée ou moyenne s'appuient systématiquement sur l'imagerie visuelle, tandis que les aphantasiques utilisent diverses autres stratégies : visualisation ou mémoire spatiale, imagerie alternative (kinesthésique, auditive, etc.), traitement sémantique ou "connaissances" amodales. De même, 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.

Ce phénomène pourrait être lié au fait que les individus aphantasiques ont été principalement identifiés à l'aide du VVIQ (Marks, 1973), qui est corrélé positivement avec l'échelle objet de l'OSIQ, mais pas avec l'échelle spatiale, ni avec les tâches d'imagerie spatiale (Blazhenkova et al., 2006a, 2006b; Blazhenkova & Kozhevnikov, 2010; Blazhenkova & Pechenkova, 2019). Le VVIQ permettrait donc de détecter sélectivement les déficiences de l'imagerie visuelle des objets, mais pas de l'espace. À ce titre, Blazhenkova et Pechenkova (2019) ont émis l'hypothèse qu'il pourrait exister deux types d'imagerie extrême (potentiellement congénitale) : l'aphantasie des objets d'une part, et l'aphantasie spatiale d'autre part (et inversement, deux types d'hyperphantasie). Dans une étude récente examinant pour la première fois cette hypothèse de manière systématique, Palermo et al. (2022) ont rassemblé des preuves très prometteuses de l'existence d'aphantasies et d'hyperphantasies objectales et spatiales, en utilisant l'OSIQ et des questionnaires évaluant plusieurs compétences. Elles ont également montré que les deux sous-types d'aphantasie étaient associés à des modèles différents de difficultés cognitives : les aphantasiques "objet", comme nous l'avons vu précédemment, ont montré des difficultés à imaginer des objets et à reconnaître des visages, tandis que les aphantasiques "spatiaux" avaient des problèmes avec les tâches d'imagerie mentale visuospatiale et le sens de la direction - un modèle opposé de performances a été observé pour les deux types d'hyperphantasie.

1.3.3 Des styles cognitifs équilibrés entre imagerie objet et spatiale

Ces résultats sur l'imagerie d'objet et spatiale introduisent une deuxième dimension (spatiale) significative dans l'imagerie visuelle et la recherche sur l'aphantasie, qui semble afficher des modèles opposés à la composante (objet) qui a été distinguée dans les études précédentes : avoir ces deux axes permet d'envisager une possibilité pour le profil " équilibré " hypothétique de l'aphantasie, qui pourrait être basé sur un équilibre entre les méthodes de représentation mentale visuelle-objet et visuelle-spatiale.

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 STEM, 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 différaient 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.

1.3.4 Un “trade-off” entre imagerie objet et spatiale chez les aphantasiques ?

Une question ouverte reste celle du lien potentiel entre l’imagerie visuelle objet et spatiale, et plus particulièrement ici dans les cas d’aphantasie. Les voies ventrales et dorsales régissant ces deux aspects étant connues pour être fonctionnellement et anatomiquement différentes (Mishkin & Ungerleider, 1982), il a longtemps été considéré que les deux processus visuels objet et spatial étaient des composantes mutuellement indépendantes de la représentation et de l’imagerie (Farah et al., 1988; Mishkin & Ungerleider, 1982). Néanmoins, Kozhevnikov et al. (Kozhevnikov et al., 2010) ont montré, sur cinq groupes d’âge différents et quatre groupes de spécialisation différents, que les artistes visuels avaient des capacités de visualisation d’objets supérieures à la moyenne mais des capacités de visualisation spatiale inférieures à la moyenne, tandis que les scientifiques présentaient le schéma inverse. Aucun des groupes professionnels (artistes, scientifiques, architectes ou spécialistes des sciences humaines) ne présentait à la fois des capacités de visualisation d’objets et des capacités de visualisation spatiale supérieures à la moyenne : il a donc été proposé qu’il pouvait y avoir un compromis entre les capacités de visualisation d’objets et les capacités de visualisation spatiale. Comme l’étude a montré que les scores d’imagerie globale (spatiale + objet) étaient relativement homogènes chez tous les participants, ce compromis impliquerait l’existence d’un “goulot d’étranglement” dans la quantité totale des capacités d’imagerie, qui nécessiterait leur affectation en fonction de l’activité de chacun. Par conséquent, on peut supposer qu’un tel compromis pourrait exister, dans le cas de l’aphantasie, entre les ressources objet et spatiales : les aphantasiques objet, les cas d’aphantasie les plus étudiés, pourraient potentiellement compenser cette imagerie

objet réduite par une imagerie spatiale plus vive - une possibilité qui, jusqu'à présent, n'a pas été étudiée en profondeur en raison de l'accent mis sur la composante objet singulière de l'aphantasie.

La dualité de l'imagerie visuelle entre l'objet et l'espace, l'existence proposée de formes spécifiques d'images extrêmes qui leur sont associées, et la distinction apparente des profils cognitifs entre les visualiseurs "objet" et les visualiseurs "espaces" spatiaux", soutiennent l'hypothèse que les aphantasies soient des conditions équilibrées. Elles pourraient avoir leurs propres avantages et inconvénients qui pourraient être répartis sur plusieurs dimensions : parmi lesquelles le traitement visuel-objet ou visuospatial, mais peut-être aussi le traitement verbal, en accord avec les modèles précédemment développés de styles cognitifs Objet-Spatial-Verbal (Blazhenkova & Kozhevnikov, 2009), et comme l'ont supposé Zeman et al. (A. Zeman et al., 2020).

2 Expérience

2.1 Méthode

2.1.1 Participants

2.1.2 Matériel expérimental

2.1.2.1 Questionnaires

2.1.3 Equipement

2.1.4 Procédure expérimentale

2.1.5 Analyses

2.2 Variables et hypothèses

2.2.1 Variables indépendantes

2.2.2 Variables dépendantes

2.2.3 Hypothèses opérationnelles

2.3 Résultats

2.3.1 Différences de moyenne des deux groupes

2.3.2 Corrélations entre les variables mesurées

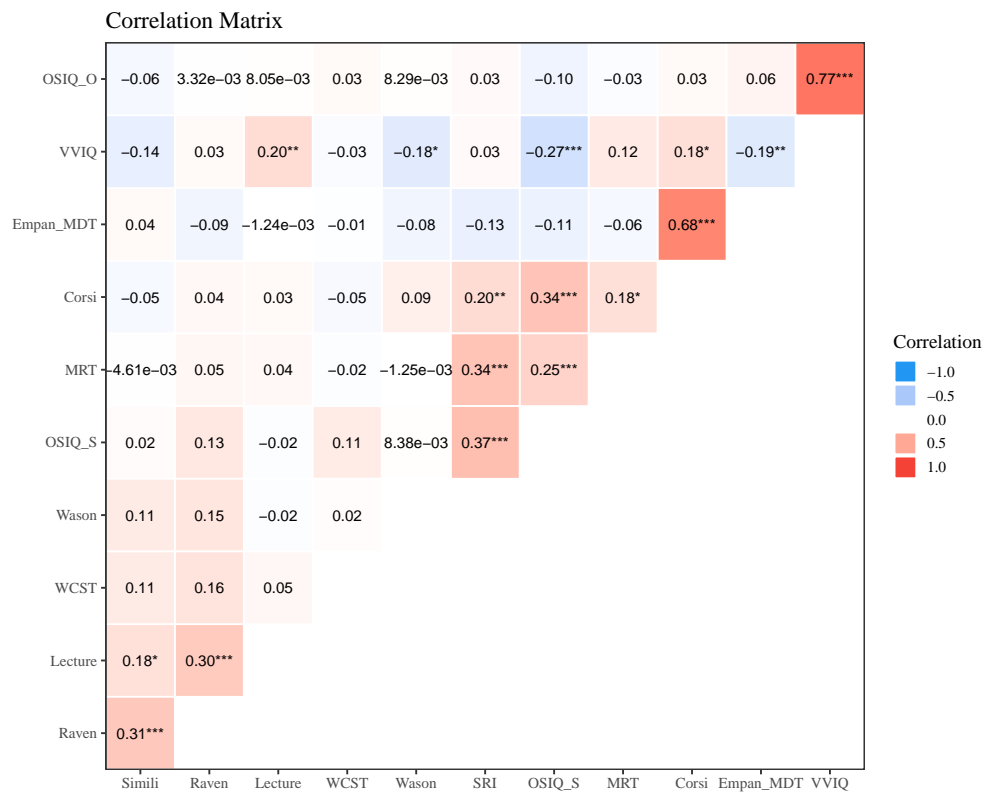


Figure 1: Matrice de corrélation entre les variables mesurées.

2.3.3 Analyses des groupes par partition non-supervisée

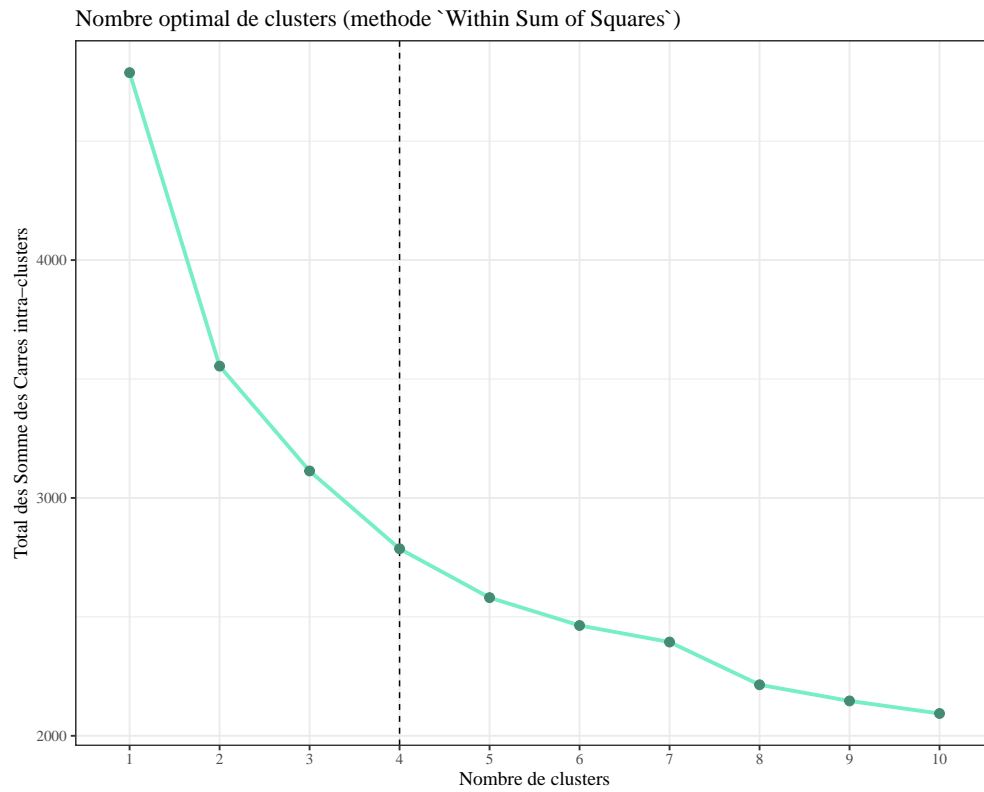


Figure 2: Graphique représentant l'évaluation du nombre idéal de clusters par la méthode 'Within Sum of Squares'.

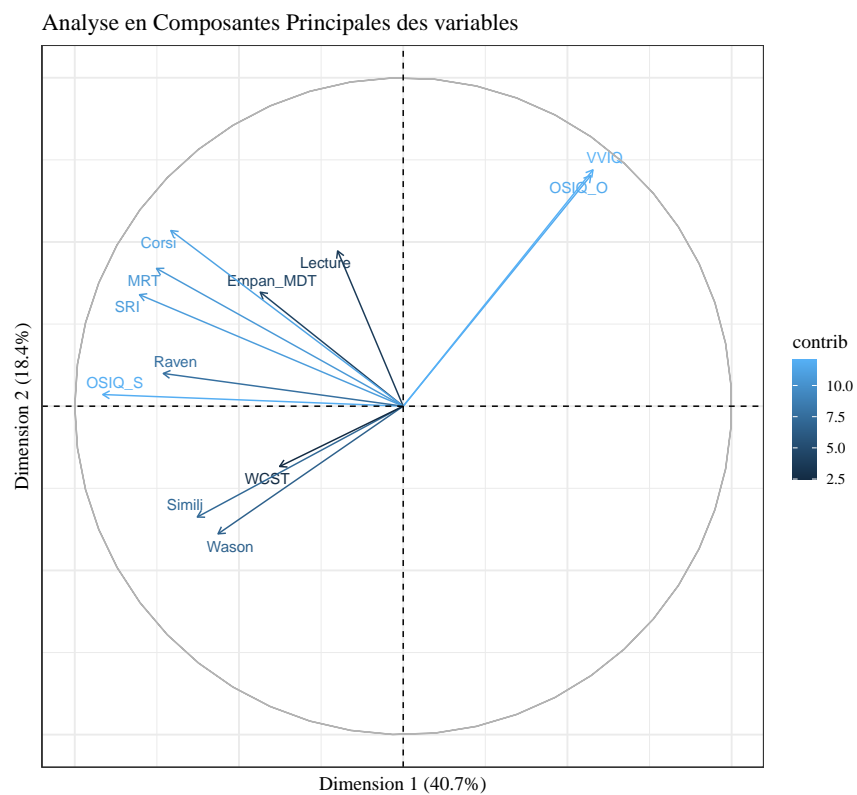


Figure 3: Représentation de l'analyse en composantes principales des variables mesurées.

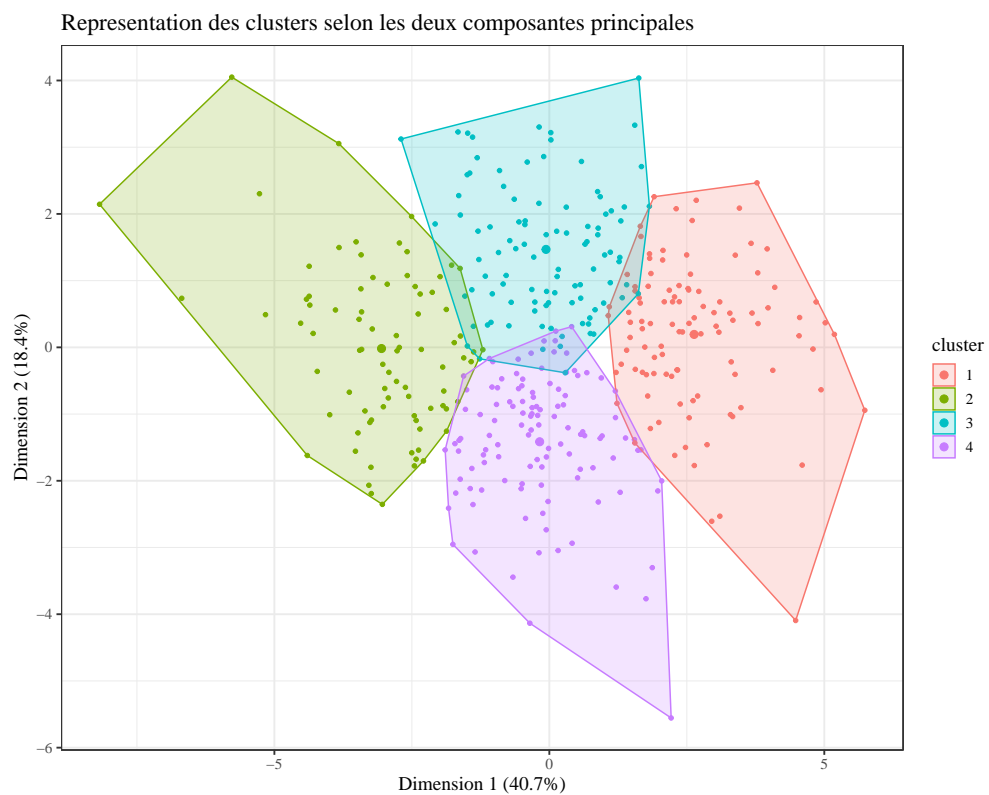


Figure 4: Représentation des clusters reconnus par la méthode des 'k-means', selon les deux composantes principales de l'ACP.

2.3.4 Analyse des clusters

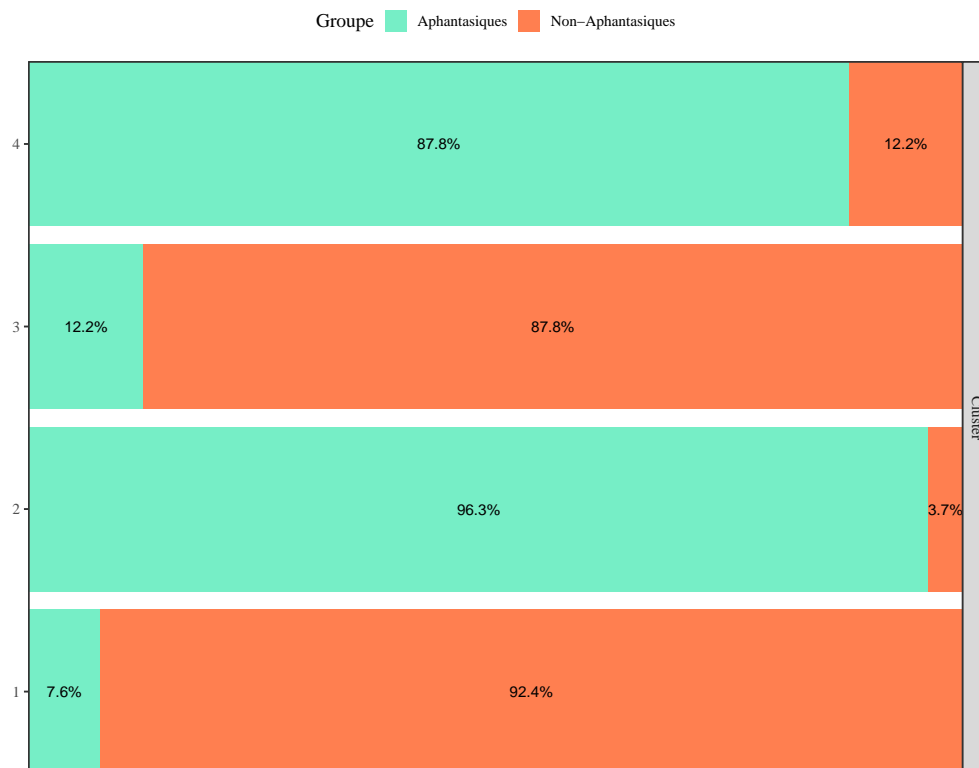


Figure 5: Répartition des groupes par cluster.

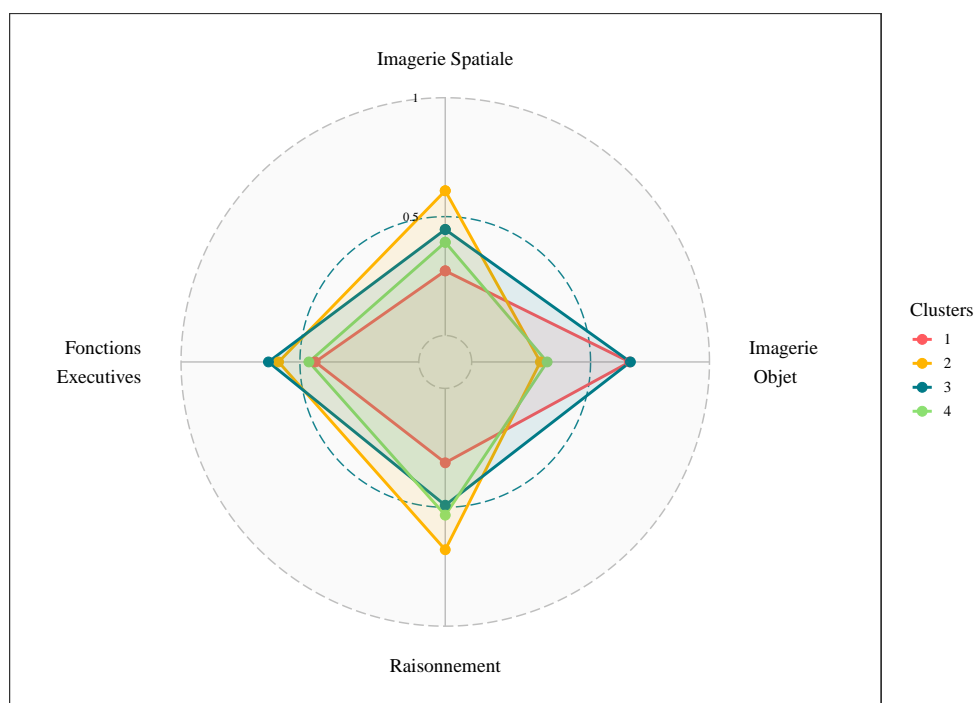


Figure 6: Diagramme représentant les profils cognitifs associés à chaque cluster, selon quatre dimensions principales : l'imagerie visuelle-objet, l'imagerie visuo-spatiale, le raisonnement et les fonctions exécutives.

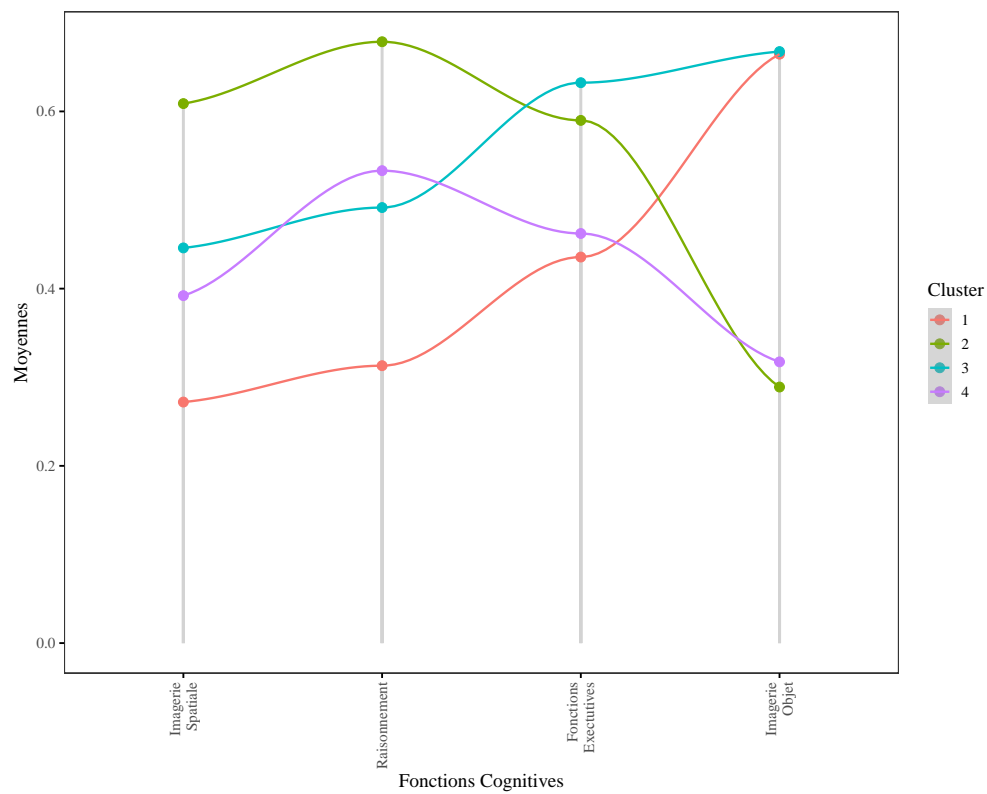


Figure 7: Représentation alternative des profils cognitifs associés aux clusters.

2.3.5 Différences entre les groupes identifiés

[1] FALSE

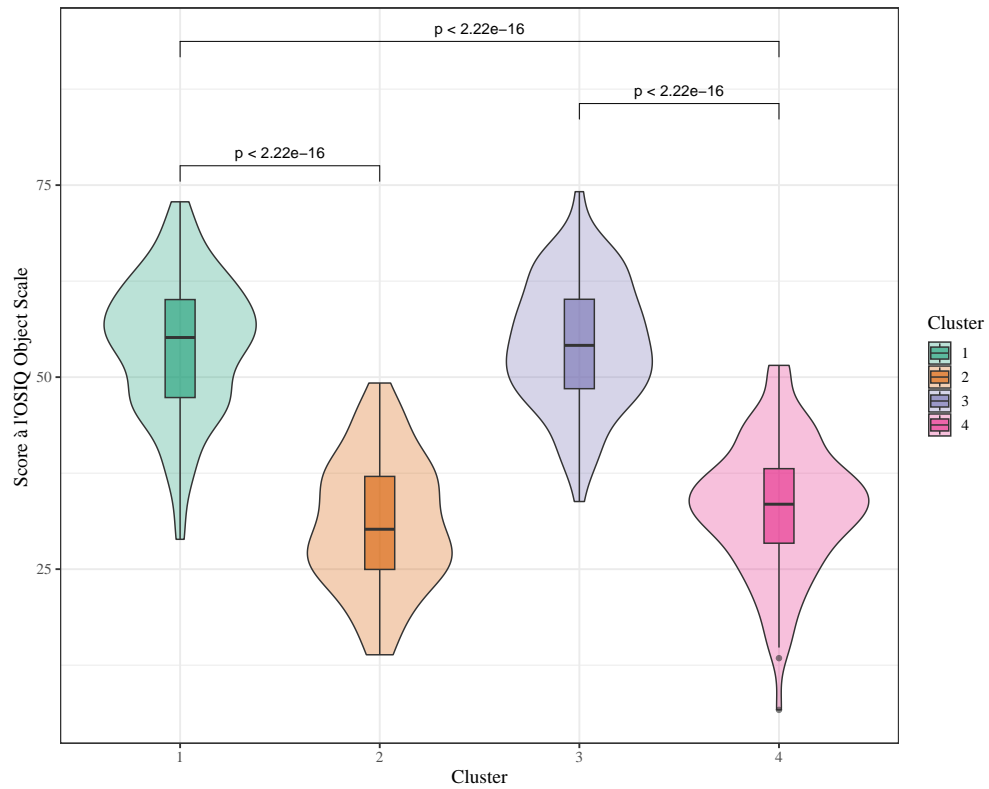


Figure 8: Comparaison des moyennes de score d'imagerie visuelle-objet entre les quatre groupes identifiés.

3 Discussion

Références

- 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>
- 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>
- Blazhenkova, O., & Pechenkova, E. (2019). The Two Eyes of the Blind Mind: Object vs. Spatial Aphantasia? *Russian Journal of Cognitive Science*, 6(4, 4), 51-65. <http://dx.doi.org/10.47010/19.4.5>
- Blomkvist, A. (2022). Aphantasia: In Search of a Theory. *Mind & Language*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1111/mila.12432>
- Boccia, M., Piccardi, L., Palermo, L., Nemmi, F., Sulpizio, V., Galati, G., & Guariglia, C. (2015). A Penny for Your Thoughts! Patterns of fMRI Activity Reveal the Content and the Spatial Topography of Visual Mental Images. *Human Brain Mapping*, 36(3), 945-958. <https://doi.org/10.1002/hbm.22678>
- 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.
- 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*.
- 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>
- Della Sala, S., Gray, C., Baddeley, A., Allamano, N., & Wilson, L. (1999). Pattern Span: A Tool for Unwelding Visuo-Spatial Memory. *Neuropsychologia*, 37(10), 1189-1199. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00159-6)
- 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/10.1016/j.hie.2021.03.001>

.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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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)
- 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., Hegarty, M., & Mayer, R. E. (2002). Revising the Visualizer-Verbalizer Dimension: Evidence for Two Types of Visualizers. *Cognition and Instruction*, 20(1), 47-77. <https://www.jstor.org/stable/3233862>
- 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>
- 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>
- Marks, D. F. (1973). Vividness of Visual Imagery Questionnaire. *Journal of Mental Imagery*.
- 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>
- Mishkin, M., & Ungerleider, L. G. (1982). Contribution of Striate Inputs to the Visuospatial Functions of Parieto-Preoccipital Cortex in Monkeys. *Behavioural Brain Research*, 6(1), 57-77. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(82\)90081-X](https://doi.org/10.1016/0166-4328(82)90081-X)
- 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>
- Morton, N., & Morris, R. G. (1995). Image Transformation Dissociated from Visuospatial Working Memory. *Cognitive Neuropsychology*, 12(7), 767-791. <https://doi.org/10.1080/02643299508251401>

- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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

Code complet des analyses :

```
#  
# ---- Aphantasia Project - Source code -----  
#  
# Delem, Fourment, Junoy, Leal De Almeida  
# Email : m.delem@univ-lyon2.fr  
# Last update : February 11, 2022  
  
# ---- setup -----  
  
# packages  
shelf(  
  MASS,      # functions and data frame ecosystem  
  easystats, # modelling, visualization and reporting ecosystem  
  ez,        # analysis and visualization of factorial exp  
  rstatix,   # pipe friendly statistical functions  
  scale,     # scale functions  
  corrr,     # correlations  
  lme4,      # mixed models  
  lmerTest,  # tests in lmer  
  cluster,   # cluster analysis  
  factoextra, # multivariate data analysis visualization  
  GGally,    # more ggplot2 plots  
  ggpubr,    # publication plots  
  ggradar,   # radar charts  
  ggraph,    # auto graph layout  
  igraph,    # network graphs  
)
```

```

# global theme
theme_set(theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif"))

# random seed
set.seed(14051998)

# Simulation des donnees

# definition des variables et groupes
# groupe non-aphantastique
Non_A <- data.frame(
  name = c("OSIQ_0", "OSIQ_S", "VVIQ",
           "Raven", "Simili", "Wason",
           "Empan_MDT", "WCST", "Lecture",
           "Corsi", "MRT", "SRI"),
  mean = c(54.6, 46.2, 63.8,
           20.9, 37.8, 32.2,
           6.43, 32.1, 50.2,
           5.81, 16.5, 35.7),
  sd = c(8.45, 9.54, 9.67,
         5.34, 4.25, 3.78,
         2.12, 5.32, 8.89,
         1.87, 3.54, 6.23),
  group = ("Non_A") %>% factor(),
  n_subjects = 200
)

# groupe aphantastique
Aph <- data.frame(

```



```

name = c("OSIQ_0", "OSIQ_S", "VVIQ",
         "Raven", "Simili", "Wason",
         "Empan_MDT", "WCST", "Lecture",
         "Corsi", "MRT", "SRI"),

mean = c(32.5, 58.9, 30.2,
         23.6, 42.2, 36.1,
         7.53, 33.8, 48.4,
         6.8, 18.2, 38.5),

sd = c(8.45, 9.54, 9.67,
       4.24, 6.15, 3.47,
       1.45, 2.62, 9.67,
       1.65, 5.78, 8.21),
group = ("Aph") %>% factor(),
n_subjects = 200
)

# dataset fusionné
variables <- bind_rows(Aph, Non_A)
rm(Aph, Non_A)

# liens variables-capacités cognitives
fmodel <- matrix(c( .8, 0, 0, 0, 0, # OSIQ-0 = img objet
                   0, .9, 0, 0, 0, # OSIQ-S = img spatiale
                   .9, 0, 0, 0, 0, # VVIQ = img objet
                   .1, .3, .8, 0, .05, # Raven = raisonnement > img s/o > flex
                   -.2, 0, .6, 0, .1, # Simili = raisonnement > flex
                   -.1, 0, .3, 0, 0, # Wason = raisonnement

```

```

        0,    0,    0, .8,    0, # Empan = MDT
    -.1,    0, .2,    0, .6, # WCST = Flex > raisonnmt
    .4,    0, .6,    0,    0, # Lecture = img objet > raisonnmt
    .1,    .7,    0, .8,    0, # Corsi = MDT > img s
    .2, .85,    0,    0,    0, # MRT = img s
    .1,    .9,    0,    0,    0 # SRI = img s
    ),
    nrow=12, ncol=5, byrow=TRUE)

# liens entre capacites cognitives
effect <- matrix(c( 1,-.1,-.1, .2,    0, # img o
    -.1,    1, .3, .2,    0, # img s
    -.1, .3,    1,    0, .2, # raisonnmt
    .2, .2,    0,    1,    0, # MDT
    0,    0, .2,    0,    1 # flex
    ),
    nrow=5, ncol=5, byrow=TRUE)

# fonction de simulation
simulation <- function(variables, fmodel, effect) {

    ### preparatifs ###
    n_variables <- dim(fmodel)[1] # notre nb de mesures/variables (rows)
    n_skills <- dim(fmodel)[2]    # les capacites sous-jacentes evaluees (columns)

    # matrice de poids des erreurs
    errorweight <- (1 - diag(fmodel %*% t(fmodel))) %>%
        abs() %>% # necessaire pour la racine carree
        sqrt() %>% # doit avoir des arguments positifs
        diag()     # recree une matrice diagonalisee

```

```

# initialisation d'un dataframe vide
data <- data.frame()

### simulation ###
for (i in levels(variables$group)){ # on simule separement chaque groupe

  var_group = variables %>% filter(group == i) # donnees du groupe isolees
  n_subjects = var_group$n_subjects[1]          # nb de sujets dans le groupe
  group = i                                     # nom du groupe

  # generation de scores aleatoires normaux pour chaque capacite cognitive
  randomscores <- matrix(rnorm(n_subjects * (n_skills)),
                        nrow = n_subjects,
                        ncol = n_skills)

  # ponderation par la matrice d'effets = les scores sont desormais correles
  # entre eux
  skillscores <- randomscores %*% effect

  # genere les valeurs standardisees des mesures/variables grace a fmodel
  observedscores <- skillscores %*% t(fmodel)

  # generation d'erreurs normales pour chaque mesure/variable
  randomerror <- matrix(rnorm(n_subjects * (n_variables)),
                        nrow = n_subjects,
                        ncol = n_variables)

  # ponderation par notre matrice de poids des erreurs
  error <- randomerror %*% errorweight

  # nos mesures effectives = les valeurs reeles + une erreur standard

```

```

measures <- observedscores + error

# on cree un dataframe avec le nom de groupe
data_group <- data.frame(measures) %>%
  mutate(Group = group %>% factor())

# ajout des valeurs reeles de moyenne et d'ecart-type pour chaque variable
# et renommage
for (i in 1:length(var_group$name)){
  data_group[,i] = data_group[,i]*var_group$sd[i] + var_group$mean[i]
  colnames(data_group)[i] = var_group$name[i]
}

# fusion avec le dataframe complet
data <- bind_rows(data,data_group)
}

# ajout d'id individuels et stats demographiques
n = length(data[,1]) # nombre total de participants
data <- data %>%
  mutate(Subject_nr = row_number() %>% as.character(),
         Sex = (c("H","F") %>% rep(times = n/2) %>% factor()),
         Age = seq(from = 16, to = 55, by = 1) %>% sample(size = n,
                                                         replace = TRUE)
         ) %>%
  relocate(Subject_nr)

# mission accomplished!
return(data)
}

```

```

# la fonction est donc clefs en main
data <- simulation(variables,fmodel,effect)

# standardisation
# Paradoxalement on va defaire ce qu'on a construit avec les moyennes,
# en re-standardisant tous les scores sous forme de z-scores
data_scale <- data %>%
  select(OSIQ_0:SRI) %>%
  mutate(across(everything(), ~ scale(.x)))

# k-means clustering
data_kmeans <- kmeans(data_scale,
                      centers = 4,
                      nstart = 100)

# on ajoute les clusters aux donnees des participants
data <- data %>% mutate(Cluster = data_kmeans$cluster %>% factor())

# Profils cognitifs sous-jacents des clusters
# on fusionne les scores des composantes proches
deep <- data %>%
  mutate(Spatial_Img = OSIQ_S + Corsi + MRT + SRI,
         Object_Img = OSIQ_0 + VVIQ,
         Reasoning = Raven + Simili + Wason,
         Executive = Empan_MDT + WCST + Lecture) %>%
  select(Spatial_Img : Executive, Cluster) %>%
  mutate(across(c(Spatial_Img : Executive),
                ~ rescale(.x, to = c(0,1))),)

```

```

# on cree un dataset d'analyse avec les variables continues standardisees
# (pour plus tard)
data_analysis <- data %>%
  mutate(across(c(-Subject_nr, -Group, -Sex, -Age, -Cluster),
    ~ scale(.x))
  )

# ---- correlation_matrix ----
# package "correlations" de easystats
data_scale %>%
  correlation(partial = TRUE) %>%
  cor_sort() %>%
  summary() %>%
  visualisation_recipe(
    labs = list(title = "Correlations entre les variables mesurees")) %>%
  plot() +
  theme(panel.grid.major = element_blank(),
    panel.grid.minor = element_blank())

# ---- network_plot ----
# graphe en reseau (corrr, igraph & ggraph)
data_scale %>%
  correlate() %>%
  stretch %>%
  filter(abs(r) >= .1) %>%
  mutate(x = replace(x, x == "Empan_MDT", "Empan"),
    y = replace(y, y == "Empan_MDT", "Empan")) %>%
  graph_from_data_frame(directed = FALSE) %>%
  ggraph() +
  geom_edge_arc(strength = 0.1,

```

```

aes(edge_alpha = abs(r),
     edge_width = abs(r),
     colour = r)) +
guides(edge_alpha = "none", edge_width = "none") +
scale_edge_colour_gradientn(limits = c(-1, 1),
                             colors = c("firebrick2", "dodgerblue2")) +
geom_node_point(size = 20) +
geom_node_text(aes(label = name,
                    family = "serif"),
               colour = "white",
               repel = FALSE) +
theme_graph(base_family = "serif", base_size = 10) +
#theme(legend.position = "none") +
labs(title = "Correlations entre les variables mesurees")

# ---- mixed_matrix -----
# matrice avec graphes et distributions
# GGally package
data_scale %>%
  mutate(across(everything(), ~as.numeric(.x))) %>%
  ggpairs(title = "Correlations et distributions des variables mesurees",
          lower = list(continuous = wrap("points", alpha = 0.2)),
          )

# ---- cluster_number -----
data_scale %>%
  fviz_nbclust(kmeans, method = "wss",
               linecolor = "white") +
  geom_vline(xintercept = 4, linetype = 2) +

```

```

theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif") +
geom_line(aes(group = 1), color = "aquamarine2",size = 1.3) +
geom_point(group = 1, size = 3, color = "aquamarine4") +
labs(title = "Nombre optimal de clusters (methode `Within Sum of Squares`)",
      x = "Nombre de clusters",
      y = "Total des Somme des Carres intra-clusters")

# ---- pca_variables -----
data_scale %>%
prcomp(scale = TRUE) %>%
fviz_pca_var(repel = TRUE,
             col.var = "contrib",
             title = "Analyse en Composantes Principales des variables") +
theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif") +
theme(axis.text.x=element_blank(),
      axis.ticks.x=element_blank(),
      axis.text.y=element_blank(),
      axis.ticks.y=element_blank()) +
labs(x = "Dimension 1 (40.7%)",
      y = "Dimension 2 (18.4%)")

# ---- k-means -----
data_kmeans %>%
fviz_cluster(
  data_scale,
  geom = "point",
  repel = TRUE,
  ellipse.type = "convex",
  shape = "circle", pointsize = 1.2,

```



```

main =
  "Representation des clusters selon les deux composantes principales",
xlab = "Dimension 1 (40.7%)",
ylab = "Dimension 2 (18.4%)",
) +
theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif")

# ---- cluster_repartition -----
# repartition des groupes par cluster
data %>%
  ggbivariate(outcome = "Group",
              explanatory = "Cluster") +
  scale_fill_manual("Groupe",
                    values = c("aquamarine2", "coral"),
                    labels = c("Aphantasiques", "Non-Aphantasiques")) +
  labs(title =
        "Repartition des aphantasiques et non-aphantasiques dans les clusters")

# ---- profiles_radar -----
deep %>%
  group_by(Cluster) %>%
  summarise(across(everything(), mean)) %>%
  ggradar(base_size = 10,
          font.radar = "serif",
          values.radar = c("0", "0.5", "1"),
          grid.label.size = 4,
          axis.labels = c("Imagerie Spatiale",
                          "Imagerie\n Objet",
                          "Raisonnement",
                          "Fonctions\n Executives"),

```

```

    grid.min = 0, grid.mid = .5, grid.max = 1,
    label.gridline.min = FALSE,
    group.line.width = 1, group.point.size = 3,
    group.colours =,
    background.circle.transparency = .1,
    legend.title = "Clusters",
    legend.text.size = 12,
    legend.position = "bottom",
    plot.title = "Profils cognitifs des clusters identifiées
par partition non-supervisée (k-means)",
    fill = TRUE,
    fill.alpha = 0.1
) +
theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif") +
theme(axis.text.x=element_blank(),
      axis.ticks.x=element_blank(),
      axis.text.y=element_blank(),
      axis.ticks.y=element_blank()) +
theme(panel.grid.major = element_blank(),
      panel.grid.minor = element_blank())
#facet(facet.by = "Cluster")

# ---- profiles_lollipop -----
deep %>%
gather(key = variable, value = value, -Cluster) %>%
mutate(variable = replace(variable, variable == "Spatial_Img", "Imagerie\n Spatiale"),
      variable = replace(variable, variable == "Reasoning", "Raisonnement"),
      variable = replace(variable, variable == "Object_Img", "Imagerie\n Objet"),
      variable = replace(variable, variable == "Executive", "Fonctions\n Executives")
group_by(variable, Cluster) %>%

```

```

summarise(mean = mean(value)) %>%
ggdotchart(
  x = "variable",
  y = "mean",
  group = "Cluster",
  color = "Cluster", size = 1, dot.size = 3,
  palette = "aas",
  add = "segment",
  position = position_dodge(0),
  #sorting = "descending",
  #facet.by = "Cluster",
  #rotate = TRUE,
  #legend = "none",
  ggtheme = theme_bw(base_size = 14, base_family = "serif"),
  xlab = "Fonctions Cognitives",
  ylab = "Moyennes",
  title =
    "Scores aux differentes fonctions cognitives en fonction des clusters"
) +
geom_smooth(aes(group = Cluster, color = Cluster),size = .8) +
theme(panel.grid.major = element_blank(),
      panel.grid.minor = element_blank(),
      )

# ---- object_img_violins -----
# Comparaisons de moyennes entre clusters par variable

# Object mean comparison
data %>%

```

```

ggplot(aes(x = Cluster, reorder(1, 2, 3, 4),
          y = OSIQ_0,
          fill = Cluster,)) +
geom_violin(alpha = 0.3,
            position = position_dodge(1),
            draw_quantiles = FALSE,) +
geom_boxplot(alpha = 0.6,
             position = position_dodge(1),
             width = 0.15,) +

# significance indicator labels
stat_compare_means(comparisons = list(c("1", "2"),
                                       c("3", "4"),
                                       c("1", "4")),
                  method = "t.test",
                  label = "p.format",
                  # height of the labels
                  label.y.npc = c("top")) +
# different filler colors
scale_fill_brewer(palette = "Dark2") +
scale_colour_brewer(palette = "Dark2") +
labs(title = "Distribution des scores d'imagerie visuelle-objet par cluster",
      x = "Cluster",
      y = "Score à l'OSIQ Object Scale")

#---- spatial_img_violins -----
# Spatial mean comparison
data %>%
  ggplot(aes(x = Cluster, reorder(1, 2, 3, 4),

```

```

    y = OSIQ_S,
    fill = Cluster,)) +
geom_violin(alpha = 0.3,
    position = position_dodge(1),
    draw_quantiles = FALSE,) +
geom_boxplot(alpha = 0.6,
    position = position_dodge(1),
    width = 0.15,) +
# significance indicator labels
stat_compare_means(comparisons = list(c("1","2"),
                                       c("2","3"),
                                       c("3","4"),
                                       c("1","4")
),
method = "t.test",
label = "p.format",
# height of the labels
label.y.npc = c("top")) +
# different filler colors
scale_fill_brewer(palette = "Dark2") +
scale_colour_brewer(palette = "Dark2") +
labs(title = "Distribution des scores d'imagerie visuospatiale par cluster",
    x = "Cluster",
    y = "Score à l'OSIQ Spatial Scale")

```