

Quelles méthodologies peut-on utiliser pour repérer les habiletés spatiales d'étudiants ingénieurs ?

Which methodologies can be used to identify engineering students' spatial skills?

Quais metodologias podem ser usadas para identificar as habilidades espaciais de estudantes de engenharia?

Sophie Charles
ID ORCID : 0000-0002-4499-5842
CY Cergy Paris Université

MOTS CLÉS : analyse de l'activité, habiletés spatiales, stratégies de résolution, tests spatiaux

La recherche sur les habiletés spatiales s'intéresse à qualifier les processus cognitifs qui la caractérisent. Dans le cadre du projet e-FRAN EXAPP_3D, notre recherche s'est portée sur la mesure des habiletés spatiales et des compétences de modélisation volumique d'étudiants ingénieurs primo-arrivants. Pour ce faire, nous avons investigué la mesure des habiletés spatiales la plus fréquemment observée dans les études contemporaines, c'est-à-dire les tests papier-crayon. Notre recherche a mis en évidence que la performance relevée dans ces tests n'est pas révélatrice des seules compétences visées : nos premiers entretiens ont révélé une pluralité de stratégies (cognitives, comportementales) mobilisées. Cette sensibilité des tests spatiaux aux stratégies de contournement présente le défi de définir un protocole expérimental qui permette de caractériser aussi bien la performance mesurée dans ces tâches que les compétences qui y sont mises en œuvre. Cet article présente la méthodologie mixte que nous avons conçue pour répondre à ce double enjeu.



KEY WORDS: human activity analysis, solving strategies, spatial skills, spatial tests

Research on spatial ability is interested in identifying the cognitive processes which characterise it. It has been related to success in science, technology, engineering and mathematics. Completed as part of the French research project EXAPP_3D e-FRAN, our study has focused on measuring engineering freshmen's spatial and 3-D modelling skills. Pen-and-paper tests are currently the most popular method used to measure spatial skills. Our research has shown that performance on these tests is not indicative of the skills targeted by the tests alone: our first subjects reported a variety of solving strategies. The sensitivity of spatial tests to bypass strategies, in the sense that those used do not correspond to the skills targeted by the test, presents the challenge of defining an experimental protocol that characterises both the performance measured in these tasks, as well as the skills they engage. This article presents a mixed methodology which addresses this twofold issue.

PALAVRAS-CHAVE: análise da atividade, estratégias de resolução, habilidades espaciais, testes espaciais

A investigação sobre as habilidades espaciais procura qualificar os processos cognitivos que as caracterizam. No âmbito do projeto e-FRAN EXAPP_3D, a nossa investigação centrou-se na medição das habilidades espaciais e das competências de modelação volumétrica de estudantes de engenharia recém-chegados. Para isso, investigámos o método de avaliação das habilidades espaciais mais frequentemente utilizado nos estudos contemporâneos, ou seja, os testes de papel e lápis. A nossa investigação revelou que o desempenho observado nesses testes não reflete exclusivamente as competências visadas: as primeiras entrevistas mostraram uma pluralidade de estratégias (cognitivas e comportamentais) mobilizadas pelos estudantes. Esta sensibilidade dos testes espaciais às estratégias de contorno coloca o desafio de definir um protocolo experimental que permita caracterizar tanto o desempenho medido nessas tarefas como as competências efetivamente mobilizadas. Este artigo apresenta a metodologia mista que concebemos para responder a este duplo desafio.

Introduction

L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie d'investigation des habiletés spatiales plus heuristique que la seule évaluation de la performance, en complétant des mesures de performance spatiale par l'investigation des processus cognitifs mis en œuvre dans ces évaluations. L'observation de stratégies multiples et alternatives mobilisées dans les tests spatiaux (Hegarty, 2018 ; Pilardeau, 2008 ; Workman et al., 1999) pose la question de ce qu'ils mesurent réellement. Certains chercheurs (Barratt, 1953 ; French, 1965 ; Guay, 1980 ; Guay et al., 1978 ; Lohman, 1979, 1993 ; Thurstone, 1938) voient une remise en cause de la validité de ces tests dans cette mobilisation de stratégies différentes de celle visée par certains tests spatiaux. En effet, comment savoir ce qu'un test mesure s'il permet l'utilisation de stratégies alternatives ?

La recherche sur les habiletés spatiales s'intéresse depuis les travaux sur l'imagerie de Galton (1883) à décrire les processus cognitifs qui la caractérisent (Eliot, 1983 ; Tartre, 1990). Traditionnellement, ces habiletés peuvent être mesurées grâce à des tests de performance et à des tests papier-crayon (Eliot, 1983). Les tests papier, considérés plus faciles à utiliser (Lohman et al., 1987) que les tests de performance, qui nécessitent la manipulation de matériel ou la réalisation de mouvements (American Psychological Association, 2018c), sont plus utilisés. Plus récemment, on constate un recours croissant aux tests informatisés dans les études visant à évaluer ces compétences (Branoff & Dobelis, 2012 ; Kelly Jr, 2013 ; Onyancha et al., 2009 ; Tsutsumi et al., 1999) qui permettent une gestion automatisée des réponses et de relever le temps de réponse (Branoff, 2000).

Les habiletés spatiales ont notamment été liées à la réussite en sciences, technologie, ingénierie et mathématiques (STIM), que cela concerne le succès dans l'étude de ces disciplines ou l'orientation professionnelle dans ces spécialités (Wai et al., 2009). Des études spécifiques aux parcours de formation d'ingénieurs ont établi le caractère prédictif des tests spatiaux de la performance à des tâches de modélisation volumique (Branoff & Dobelis, 2012 ; Steinhauer, 2012), c'est-à-dire de simulation informatique d'un objet comme s'il existait en trois dimensions (Lieu & Sorby, 2009).

Dans le cadre du programme d’investissement français e-FRAN, qui s’intéresse aux «effets, positifs et négatifs, de l’utilisation du numérique dans les pratiques d’enseignement et d’apprentissage» (Ministère de l’Éducation nationale, de l’Enseignement supérieur et de la Recherche, Ministère de l’Économie, de l’Industrie et du Numérique et Commissariat général à l’Investissement, 2016, p. 3), notre recherche s’est portée sur la mesure des habiletés spatiales et des compétences de modélisation volumique d’étudiants ingénieurs en première année (Charles, 2023). L’objectif premier de notre recherche était de mobiliser des tests pour étudier le lien entre performance en modélisation volumique et performance spatiale, performance entendu au sens d’un résultat obtenu par la collecte de réponses (American Psychological Association, 2018b). Ce travail interrogeait les prérequis nécessaires à l’apprentissage de la modélisation volumique dans l’apprentissage de la conception pour les étudiants ingénieurs, rendu nécessaire par les pratiques professionnelles (Ault & John, 2010; Geronimi et al., 2005; Hamon, 2009). Une première phase de notre travail a consisté à repérer, puis à se procurer et enfin, à expérimenter des tests visant à mesurer différents facteurs spatiaux. Nos premières expérimentations ont révélé une pluralité de compétences, portées par plusieurs stratégies de résolution mobilisées par les participants dans la résolution des tâches qui sont présentées dans les tests spatiaux. Face à ce résultat, déjà mis en évidence par Hegarty (2018) et par Pilardeau (2008), nous avons conçu une méthodologie de caractérisation de la performance spatiale et des stratégies de résolution. Pour ce faire, notre recueil de données a combiné des méthodes quantitatives, en soumettant des étudiants ingénieurs de première année à une batterie de cinq tests spatiaux de manière à évaluer leur performance. Nous avons également utilisé des méthodes qualitatives, en demandant à nos participants de répondre à des questionnaires, ouverts et fermés, sur les stratégies qu’ils avaient mobilisées, de manière à observer les processus cognitifs mis au travail.

Cadre conceptuel

L’habileté spatiale

Selon Lohman (1993), l’habileté spatiale concerne la capacité à «générer, retenir, récupérer et transformer des images visuelles bien structurées [notre traduction]»¹. Il n’existe pas de consensus sur la nature ni sur le

1. «*generate, retain, retrieve, and transform well-structured visual images*» (Lohman, 1993, p. 3)

nombre de compétences qui la constituent (Uttal et al., 2013) et plusieurs auteurs (Hegarty, 2010; Linn & Petersen, 1985; Maier, 1996; Tartre, 1984; Uttal et al., 2013) en ont proposé une classification. Nous appuyant sur onze modèles relevés dans la littérature (Charles, 2023), nous avons repéré la récurrence de deux facteurs principaux : la visualisation spatiale et l'orientation spatiale. Le premier facteur, la visualisation spatiale, relève de la manipulation mentale d'objets en deux et en trois dimensions (Linn & Petersen, 1985; McGee, 1979; Tartre, 1984). Le second facteur, l'orientation spatiale, se rapporte à la capacité d'une personne à déterminer l'orientation d'un objet en fonction d'un point de vue donné (McGee, 1979; Tartre, 1984). Ainsi, dans le cas de la visualisation spatiale, l'observateur manipule mentalement un objet, alors que dans le cas de l'orientation spatiale, il s'agit de «comprendre ou donner du sens à une représentation visuelle [notre traduction]»² (Tartre, 1984).

La classification de Tartre (1984), illustrée dans la figure 1, reprend cette distinction pour catégoriser les tâches visant à mesurer les compétences spatiales selon le procédé cognitif que les tâches entendent mobiliser (Tartre, 1990). L'auteure reprend la différence faite par Kersh et Cook (1979, cités dans Tartre, 1984, p. 7) entre la compétence de manipulation de la totalité d'un objet, nommée rotation mentale, de celle de la manipulation d'une partie d'un objet, nommée transformation mentale. Une tâche de rotation mentale consiste par exemple à faire pivoter mentalement une forme, alors que s'imaginer plier un patron pour fabriquer un cube relève de la transformation mentale.

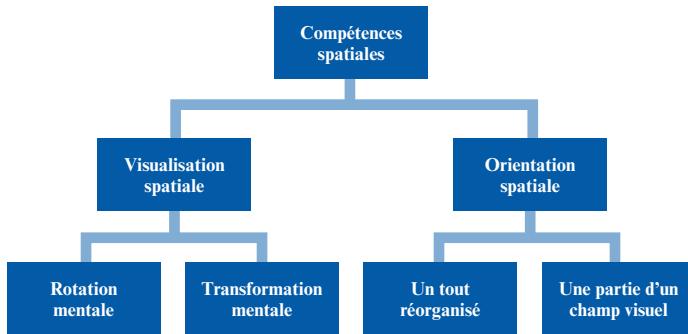
De même, Tartre (1984) sépare la capacité à «comprendre une représentation visuelle [notre traduction]»³ ou «un changement qui a eu lieu entre deux représentations [notre traduction]»⁴, de celle à comprendre la relation qu'entretient un objet avec le tout dont il est issu. Par exemple, comprendre les deux interprétations possibles du cube de Necker (1832) nécessite de changer de point de vue, alors que placer une pièce dans un *puzzle* requiert de comprendre la relation existante entre la pièce et le motif dont elle fait partie.

2. «*comprehending or making sense out of some visual representation*» (Tartre, 1984, p. 28)

3. «*understand a visual representation*» (Tartre, 1984, p. 6)

4. «*some change that has taken place between two representations*» (Tartre, 1984, p. 6)

Figure 1
Classification des compétences spatiales selon Tartre (1984)



Note. Représentation de la classification des habiletés spatiales. Adapté de Tartre (1984, p. 27).

Mesurer l'habileté spatiale

Au travers des recherches visant à définir l'habileté spatiale, différents tests psychométriques ont été conçus pour identifier les facteurs spatiaux mobilisés dans des tâches portant sur des problèmes de nature spatiale (Eliot, 1983). Nous présentons ici cinq tests visant à mesurer les quatre facteurs spatiaux issus de la classification de Tartre (1984). Nous verrons dans la méthodologie pourquoi nous avons utilisé cette sélection pour notre recherche.

Les trois premiers tests s'intéressent à la visualisation spatiale. Le *Mental Rotation Test* (MRT) (Vandenberg & Kuse, 1978) et le *Revised Purdue Spatial Visualization Test: Rotations* (R PSVT:R) (Yoon, 2011) visent à mesurer la rotation mentale. Le *Mental Cutting Test* (MCT) (College Entrance Examination Board, 1939) a pour objet d'évaluer la transformation mentale. Les deux derniers tests s'intéressent à l'orientation spatiale : le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* (PSVT:V) (Guay, 1976a) vise la capacité à comprendre un objet quelle que soit la représentation qui en est donnée, et le *Closure Flexibility Test (Concealed Figures) Form A* (CFT) (Thurstone & Jeffrey, 1965) sollicite la capacité à isoler un élément intriqué dans un motif complexe.

Le MRT présente 20 questions pour lesquelles le répondant doit identifier les deux orientations d'un objet identique à celui qui est présenté comme stimulus parmi quatre possibilités. Le répondant doit fournir deux

réponses correctes par question pour obtenir un point (Vandenberg & Kuse, 1978), le score le plus élevé étant de 20 points. Ce test est organisé en deux parties séparées par un temps de pause. Il faut adapter la durée du test en fonction de l'expérience des répondants et de la batterie de tests utilisée (A. R. Kuse, communication personnelle, 25 juin 2018).

Le R PSVT:R présente 30 questions pour lesquelles le participant doit identifier la bonne réponse parmi cinq réponses proposées. Pour ce faire, il doit observer la séquence de rotations appliquées à un exemple afin de l'appliquer au stimulus présenté dans la question. Chaque réponse correcte vaut un point, le score le plus élevé est donc de 30 points. Le temps de réponse est illimité de manière à mesurer le réel niveau d'habileté spatiale des répondants (Yoon & Mann, 2017).

Le MCT présente 25 questions pour lesquelles le répondant doit identifier, parmi cinq choix, la section résultant de la coupe représentée sur le stimulus. Comme chaque réponse correcte vaut un point, le score le plus élevé est de 25 points. Le temps de réponse est limité à 20 minutes (Eliot & Macfarlane Smith, 1983).

Le PSVT:V présente 30 questions dans lesquelles un objet est représenté. Le répondant doit imaginer cet objet flottant au milieu d'un cube de verre. Un point noir, positionné sur l'un des angles du cube de verre, indique le point de vue à adopter pour imaginer la représentation du stimulus sous cet angle. Le répondant doit identifier, parmi cinq possibilités, la vue du stimulus déterminée par le point de vue indiqué sur le cube de verre. Chaque réponse correcte vaut un point et le score le plus élevé est de 30 points. Le temps de réponse est limité à 20 minutes (Eliot & Macfarlane Smith, 1983).

Le CFT présente 49 questions pour lesquelles le répondant doit indiquer si le stimulus est présent dans quatre motifs complexes. Pour certaines questions, il y a plusieurs réponses correctes. Le score est calculé en additionnant le nombre de réponses correctes, auquel on soustrait le nombre de réponses incorrectes. Le score le plus élevé est de 196 points. Le temps est limité à dix minutes et les instructions précisent qu'il n'est pas attendu que l'ensemble des questions soit traité dans le temps imparti (Thurstone & Jeffrey, 1956).

Les caractéristiques des tests spatiaux et l'affordance

Ces tests ont des attributs communs quant à leur format : ce sont des questionnaires à choix multiples (QCM), limités dans le temps (à l'exception du R PSVT:R). Les QCM ont été décrits comme favorisant la comparaison et la sélection parmi des réponses possibles (Leclercq, 2006 ; Lohman, 1979) et n'encourageant pas la production d'une réponse indépendante (Bloom & Broder, 1950 ; Hopkins, 1998 ; Leclercq, 2006). Les tests non limités dans le temps permettraient de mettre en œuvre un nombre plus élevé de stratégies (Schwartz, 1963), alors que les tests très limités dans le temps, dont les instructions précisent de répondre correctement malgré cette contrainte, modifieraient le style de réponse des participants (Hopkins, 1998). Par exemple, Cooke-Simpson et Voyer (2007) observent dans leur étude que, face à la double contrainte de répondre rapidement et correctement, les femmes préfèrent ne pas répondre plutôt que de répondre au hasard.

Les formes sur lesquelles portent les questions présentent des caractéristiques spécifiques : dans le cas du PSVT:V, du R PSVT:R et du MCT, ce sont des représentations isométriques⁵, soit des représentations faciles à dessiner mais difficiles à comprendre pour des répondants qui ne sont pas familiers avec ces représentations (Yue, 2006). Le MRT, quant à lui, présente des formes constituées d'un ensemble de cubes coudé à deux reprises : elles sont caractérisées par des éléments saillants, comme le nombre de cubes et l'orientation des coudes.

Ces caractéristiques sont autant d'affordances, c'est-à-dire d'invitations à l'action, par exemple, à la manipulation : « Un objet rigide à angle dièdre aigu, présentant une lame, afforde la coupe et le raclage : c'est un couteau [notre traduction] »⁶ (Gibson, 2015). S'appuyant sur la *Gestalttheorie* (Wertheimer, 1923), Gibson (2015) définit l'affordance comme quelque chose d'invariant, que les observateurs perçoivent, ou pas. Elle concerne les objets, aussi bien que les environnements dans lesquels se trouvent ces objets. Extérieures aux répondants et à leurs besoins, les affordances sont constamment disponibles à la perception, même si elles ne sont pas toujours perçues. Elles relèvent d'un « processus de perception

-
5. Ce sont des dessins faciles à dessiner qui représentent dans les mêmes proportions la face avant, la face de dessus et la face de côté (Yue, 2006, Abstract).
6. « *A rigid object with a sharp dihedral angle, an edge, affords cutting and scraping: it is a knife* » (Gibson, 2015, p. 125)

d'un objet écologique riche de valeur [notre traduction]»⁷ (Gibson, 2015) et sont «spécifiées dans les informations du stimulus [notre traduction]»⁸ (Gibson, 2015). Dans le cas des tests, la définition d'affordance de Gibson est complétée par Salmani Nodoushan (2021), qui lui oppose celle de la fonction d'un test : celle-ci concerne l'usage spécifique et délimité d'un test, alors que les affordances regroupent toutes les fonctions et les usages subsidiaires. À l'instar d'une chaise, dont la fonction principale est de permettre de s'asseoir mais sur laquelle on peut monter ou que l'on peut lancer, les tests présentent des affordances périphériques éloignées de la compétence qu'ils visent à mesurer. C'est en sens que nous proposons que les caractéristiques des tests spatiaux, comme la nature des stimuli ou le mode de passation, sont des affordances, car elles structurent le mode de raisonnement des répondants : les QCM et les caractéristiques des objets qu'ils présentent affordent des stratégies de résolution.

Les stratégies de résolution de tâches spatiales

Si ces tests permettent d'évaluer la capacité à résoudre les tâches spatiales qui y sont présentées, ils ne nous renseignent cependant pas sur l'activité des répondants qui y prennent part. Une partie de la recherche dédiée à l'habileté spatiale s'intéresse aux sources de variance de performance mesurée au travers des tests spatiaux, dont les stratégies de résolution mises en œuvre dans les tâches présentées dans ces outils de mesure (Eliot, 1987). Les tests ayant été conçus pour mesurer des compétences spécifiques, l'interprétation juste de performances individuelles mesurées ne peut se limiter aux résultats et doit «investiguer la nature des procédés mentaux qui sous-tendent les réponses à ces instruments [notre traduction]»⁹ (Bloom & Broder, 1950). De même, Leplat (2004) considère que «l'habileté ou compétence est un concept abstrait qui ne peut être analysé qu'à travers des manifestations observables de l'activité» (p. 104). Selon lui, une tâche correspond à un «but à atteindre et les conditions dans lesquelles il doit être atteint», alors qu'une activité concerne «ce qui est mis en œuvre par le sujet pour exécuter la tâche» (p. 204). Celle-ci peut être rapprochée de la stratégie que l'APA Dictionary of Psychology (2018d) décrit comme «un programme d'action destiné à atteindre un but ou à accomplir une

7. «process of perceiving a rich-value ecological object» (Gibson, 2015, p. 132)

8. «specified in stimulus information» (Gibson, 2015 p. 131)

9. «investigate the nature of the mental processes underlying the responses to these instruments» (Bloom & Broder, 1950, p. 3)

tâche»¹⁰. Qu'il parle d'activité ou de stratégie, le chercheur peut étudier l'exécution de la tâche en observant des répondants en conditions normales de réalisation ou dans des conditions provoquées par l'analyste grâce, par exemple, à des protocoles verbaux réalisés pendant (Lemaire, 2015) ou après l'activité (Leplat, 2004). Hegarty (2018) combine des entretiens concurrents et rétrospectifs pour interroger les stratégies adoptées par 47 étudiants dans la résolution des questions de la seconde partie du MRT. Albaret et Aubert (1996), quant à eux, ont invité 288 lycéens à décrire en une phrase la méthode employée pour répondre aux questions du MRT. Ces études (Albaret et Aubert, 1996 ; Hegarty, 2018) relèvent notamment des stratégies de rotation mentale, de comparaison à l'aide d'un élément saillant, autrement nommée stratégie analytique (Eme & Marquer, 1998), et de combinaison de plusieurs stratégies pour résoudre un test qui vise à mesurer la rotation mentale. Ces observations dépendent cependant de la capacité des participants à verbaliser des processus mentaux (Bloom & Broder, 1950 ; Pilardeau, 2008), dont ils ne sont pas toujours conscients (Bloom et Broder, 1950 ; Lemaire, 2015 ; Lohman, 1979).

Une autre solution consiste à inférer les stratégies à partir d'indicateurs de performance, comme le temps de réalisation. Lohman et Kyllonen (1983), qui ont adopté cette approche, affectent des temps de réalisation à des modèles de stratégie qu'ils ont préalablement définis. Selon Lemaire (2015), la méthode d'investigation indirecte présente cependant le risque de confondre des stratégies différentes réalisées dans des temps de réponse identiques. Il préconise donc d'étudier les stratégies de manière directe, chaque fois que possible, afin d'en minimiser les interprétations et les inférences. De leur côté, Dunlosky et Hertzog (2001) considèrent que les rapports rétrospectifs sont adaptés pour décrire des stratégies de résolution lorsqu'ils ont lieu juste après le test, car le risque d'oubli est réduit.

Ces études révèlent que les tests spatiaux, conçus pour évaluer une compétence spécifique, peuvent mobiliser des stratégies différentes de celle visée par le test. D'autres études encore révèlent que les participants utilisent plusieurs stratégies dans un même test (Hegarty, 2018 ; Workman et al., 1999) et que certains changent de stratégies d'une question à une autre (Pilardeau, 2008 ; Workman et al., 1999).

10. «*a program of action designed to achieve a goal or accomplish a task*» (APA Dictionary of Psychology, 2018d)

Notre revue de littérature initiale visait la caractérisation de la relation entre habiletés spatiales et modélisation volumique (Charles, 2023). À l'heure actuelle, ce champ de la recherche est investigué majoritairement par des auteurs issus du monde des sciences de l'ingénieur (Martín-Gutiérrez et al., 2013 ; Metz et al., 2016), soucieux de concevoir et d'évaluer des dispositifs pédagogiques de remédiation de l'habileté spatiale. Cet accompagnement pédagogique est jugé utile pour augmenter la rétention des étudiants dans les filières scientifiques (Sorby & Veurink, 2010), la corrélation entre performance spatiale et succès en STIM ayant été établie (Wai et al., 2009). Ces travaux s'intéressent aux tests spatiaux en tant que mesures de compétence et ne portent pas sur les stratégies de résolution. Ceci explique que ces études ne se soient pas penchées sur la question des stratégies, à la différence des recherches menées notamment dans le domaine de la psychologie (Hegarty, 2018 ; Hegarty & Waller, 2004).

Méthodologie

Notre méthodologie s'est construite en trois phases d'expérimentations et de résultats : 1) l'identification et l'utilisation des tests les plus mobilisés dans l'étude du lien entre l'habileté spatiale et la modélisation volumique (Expérimentation A), 2) des expérimentations de l'activité de personnes prenant part à des tests spatiaux (Expérimentation B) et 3) la méthodologie finale, qui regroupe des prises de performance et l'observation de l'activité mise en œuvre dans ces mesures (Expérimentation C).

L'expérimentation A

Nous avons tout d'abord investigué les tests spatiaux. Ceci a consisté à identifier, à se procurer et à expérimenter des tests. Les trois tests que nous avons trouvés le plus rapidement sont ceux les plus cités dans la revue de littérature portant sur le lien entre l'habileté spatiale et les études en ingénierie (Ault & John, 2010 ; Kelly Jr, 2013) : le MRT, le MCT et la version originale du R PSVT:R, le *Purdue Spatial Visualization Test: Rotations* (Guay, 1976b). Nous avons ensuite trouvé et choisi la version revue et corrigée de Yoon (2011), car elle n'est pas limitée dans le temps, et donc, potentiellement moins défavorable aux femmes, comme évoqué précédemment (Cooke-Simpson & Voyer, 2007). En septembre 2018, 137 étudiants ingénieurs en première année, $N_F = 37$ [27%] femmes et $N_H = 100$ [73%] hommes, ont passé le MRT et le MCT et 131 étudiants, $N_F = 36$ [27%]

femmes et $N_H = 95$ [73 %] hommes, ont passé le R PSVT:R, selon les instructions d'administration préconisées par les auteurs. Les scores ont été comparés avec les notes individuelles obtenues en Mathématiques appliquées (MAPP), qui aborde la théorie des distributions d'une variable réelle et la transformée de Laplace, en Analyse de mécanismes (AMEC), qui a pour objectif d'apprendre aux étudiants à analyser un mécanisme industriel, et en Algorithmiques et programmation (ALGO), qui traite d'algorithmique, de structures de données fondamentales et du langage C. Une analyse de variance (ANOVA) a mis en évidence le caractère prédictif du MCT, du MRT et du R PSVT:R de la performance en AMEC, ALGO et MAPP (Charles et al., 2019).

L'expérimentation B

Dans une perspective exploratoire, nous avons testé les cinq premières questions issues des tests, au fur et à mesure que nous nous les sommes procurés, auprès de différents répondants. Les premières expérimentations incluaient le filmage de personnes de notre entourage ($N_E = 2$ enfants et $N_A = 2$ adultes) en situation de résolution. Elles ont permis de relever des différences de comportement : certains, mais pas tous, avaient recours à des gestes spontanés de la main ou de la tête, comportements déjà observés par Chu et Kita (2008). Ces observations ont ensuite été complétées par des entretiens rétrospectifs de manière à interroger l'activité invisible de ces personnes. Nous cherchions alors à identifier les stratégies mobilisées dans les tests en notre possession en vue d'en repérer quatre qui mesurent chacun l'un des quatre facteurs du modèle de Tartre, illustrés dans la figure 1. Nous avons étendu ce protocole auprès d'un échantillon de volontaires composé d'enfants ($n = 4$) de notre entourage, d'étudiants ingénieurs de première année de l'école de notre futur terrain ($n = 8$), d'étudiants en sciences et techniques des activités physiques et sportives (STAPS) d'une école partenaire de notre université ($n = 6$) et de professionnels de notre entourage ($n = 4$). Cet échantillon large a été choisi de manière à ne pas recueillir des stratégies de résolution qui soient spécifiques à un âge ou à une spécialisation donnés. Ces personnes ont décrit des processus de résolution parfois différents d'une personne à une autre, ou d'une question à une autre, concernant le même test. Le tableau 1 décrit les stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux que nous nous sommes procurés :

- les tests de rotation mentale MRT et R PSVT:R ;
- les tests de transformation mentale MCT et *Santa Barbara Solids*

Test (SBST) (Cohen et Hegarty, 2007);

- les tests de changement de perspective PSVT:V, *Visualization of Viewpoints (VVT)* (Guay & McDaniel, 1976) et *Perspective Taking/ Spatial Orientation Test (PTSOT)* (Hegarty & Waller, 2004; Kozhevnikov et Hegarty, 2001);
- les tests de dissociation d'un élément intriqué CFT, *Hidden Figures Test (HFT)* (Ekstrom et al., 1976) et *Hidden Patterns Test (HPT)* (Ekstrom et al., 1976).

Nous constatons dans le tableau 1 que les tests mettent en œuvre différentes ou plusieurs stratégies de résolution, dont des stratégies différentes de celles que vise le test.

Tableau 1

Fréquence des stratégies déclarées mobilisées dans l'expérimentation B (N = 22)

Test	<i>n</i>	Stratégie utilisée												
		Transformation mentale	Rotation mentale	Orientation spatiale	Stratégie analytique	Stratégie corporelle	Combinaison RM/OS	Combinaison RM/SA	Combinaison OS/SA	Combinaison RM/OS/SA	Combinaison RM/TM	Combinaison TM/SA	Combinaison RM/SC	Combinaison RM/SA
VVT	14	0	3	3	4	0	1	0	2	0	0	0	1	0
PTSOT	14	0	2	8	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
R PSVT:R	20	0	18	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
PSVT:V	17	0	0	14	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0
MRT	9	0	5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
MCT	15	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	1
CFT	13	0	0	3	6	0	1	0	3	0	0	0	0	0
HFT	11	0	3	1	3	0	1	0	3	0	0	0	0	0
SBST	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HPT	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Note. RM = rotation mentale (Tartre, 1984), TM = transformation mentale (Tartre, 1984), OS = orientation spatiale (Tartre, 1984), SA = stratégie analytique (Eme & Marquer, 1998), SC = stratégie corporelle (Chu & Kita, 2008).

L'expérimentation C

À la suite de l'expérimentation B, nous avons retenu les tests mobilisant le plus l'un des quatre facteurs du modèle de Tartre (1984), illustré dans la figure 1 : le R PSVT:R pour la rotation mentale, le PSVT:V pour le changement de perspective, le MCT pour la transformation mentale et le CFT pour la dissociation. Nous avons de plus ajouté le test de rotation mentale MRT, en raison de son caractère prédictif de la réussite académique des étudiants ingénieurs, dont l'évaluation d'AMEC qui requiert l'utilisation d'un modeleur volumique, repéré dans l'expérimentation A, mais aussi à des fins comparatives avec les nombreuses études portant sur les habiletés spatiales et la modélisation volumique le mentionnant (Ault & John, 2010 ; Kelly Jr, 2013).

Au regard des caractéristiques des tests spatiaux, relevées dans la littérature et dans nos premières observations, nous avons déterminé une méthodologie d'investigation des habiletés spatiales qui rende compte des compétences mises au travail dans les tests spatiaux : d'une part, en évaluant la performance d'étudiants engagés dans des tâches de nature spatiale et, d'autre part, en interrogeant les processus cognitifs mis en œuvre dans ces activités. À cette fin, nous avons accompagné les tests spatiaux, qui permettent de recueillir des données quantitatives concernant la capacité des participants à résoudre des problèmes de nature spatiale, de rapports rétroactifs pour contrôler qualitativement l'objet de ces mesures.

Les participants

Notre échantillon est constitué de 146 étudiants ingénieurs en première année. Il est composé de $N_F = 27$ [18,5%] femmes et $N_H = 119$ [81,5%] hommes, provenant de classes préparatoires, de licence 2 ou 3, de sections de technicien supérieur et d'instituts universitaires de formation. Parmi ces personnes, 80 [55 %] ont reçu des enseignements technologiques en deuxième année de ces formations.

Les outils de mesure de l'habileté spatiale

Nous avons retenu cinq tests spatiaux visant à évaluer les quatre facteurs spatiaux du modèle de Tartre (1984) : le R PSVT:R et le MRT visent à évaluer la rotation mentale, le MCT la transformation mentale, le PSVT:V la capacité à changer de point de vue et le CFT l'habileté à isoler un élément intriqué dans un motif complexe.

Les consignes de passation disponibles dans les instructions des tests ont été respectées dans le cas du CFT. Nous avons suivi les indications d'Eliot et Macfarlane Smith (1983) pour le PSVT:V et pour le MCT, ainsi que les temps de passation du MRT habituellement cités dans la littérature, soit trois minutes pour la première partie, deux minutes de pause et trois minutes pour la deuxième partie, après avoir reçu confirmation de l'un des auteurs que ces temps étaient appropriés pour notre échantillon (A. R. Kuse, communication personnelle, 25 juin 2018). Nous avons limité le temps de passage du R PSVT:R à une heure, pour des raisons d'emploi du temps. L'expérimentation B ayant confirmé la présence de stratégies alternatives, l'ordre des tests de l'expérimentation C a été déterminé de manière à placer en début de batterie les tests les plus sensibles aux stratégies de contournement d'après l'expérimentation B.

L'investigation des stratégies mises en œuvre

En raison du nombre des participants et du temps disponible dans l'agenda académique, nous avons opté pour des observations consécutives (Leplat, 2004): les tests spatiaux ont été suivis de questionnaires, ouverts et fermés, visant à explorer les processus de résolution mobilisés dans les tests spatiaux. Dans un premier temps, il a été demandé aux étudiants d'expliquer le cheminement qu'ils avaient suivi pour répondre à trois questions issues de chaque test. À chaque fois, il s'agissait de refaire mentalement la question, puis de décrire le processus de résolution. Nous avons demandé à nos participants de refaire la question juste avant de répondre, de manière à recueillir le souvenir de la stratégie mobilisée le plus récent et le plus détaillé possible, comme la nature et l'ordre des étapes, les erreurs, les impasses (Bloom & Broder, 1950). Nous avons choisi trois questions par test de manière à éviter une réponse pouvant s'appliquer à toutes les questions d'un même test, comme dans le cas du QCM décrit dans le paragraphe suivant. Des items présentant des difficultés de natures différentes ont été sélectionnés : le nombre de côtés (Kyllonen et al., 1981), la nature des surfaces (Pellegrino et al., 1985), l'amplitude et le nombre de rotations (Cooper & Mumaw, 1985 ; Guay, 1980), le nombre d'éléments composant un stimulus (Pellegrino et al., 1985), ou encore la présence d'occultations (Caissie et al., 2009 ; Pellegrino et al., 1985). Les questions placées en fin de test ont été écartées pour éviter celles auxquelles les étudiants n'auraient pas eu le temps de répondre.

Nous avons ensuite demandé aux étudiants de choisir dans un QCM, parmi une liste de propositions, les stratégies qu'ils pensaient avoir utilisées dans un test. Ces propositions ont été sélectionnées à partir des stratégies les plus fréquemment décrites par les étudiants ingénieurs ($n = 8$) et les étudiants en STAPS ($n = 6$) de l'expérimentation B, pour nous rapprocher de notre public cible en âge, sans écarter des stratégies différentes de celles potentiellement mises en œuvre par des spécialistes des STIM. Les étudiants pouvaient choisir autant de réponses qu'ils le souhaitaient. Le QCM permet de compléter les réponses données dans le questionnaire ouvert, car il porte sur des stratégies utilisées dans un test, alors que le questionnaire ouvert n'explorait que les stratégies spécifiques à trois questions par test.

Le questionnaire ouvert a été placé avant le questionnaire fermé de manière à éviter que les réponses proposées dans le QCM n'influencent les réponses faites par les étudiants dans le questionnaire ouvert (Schwarz & Hippler, 1991).

Les considérations éthiques

Les étudiants ont été informés du cadre et de l'objectif de l'étude, ainsi que de son déroulé. Conformément à la Loi 2018-493 du 20 juin 2018, ils ont été mis au courant de leur droit d'accès aux données recueillies durant l'expérimentation. Ils ont signé un formulaire de consentement préalablement validé par la déléguee à la protection des données de l'école. L'ensemble des données a été anonymisé.

Les méthodes d'analyse

Les scores ont été calculés à l'aide des instructions disponibles dans le manuel pour le CFT (Thurstone & Jeffrey, 1965), les instructions indiquées dans *An International Directory of Spatial Tests* (Eliot & Macfarlane Smith, 1983) pour le MCT et le PSVT:V, les recommandations des auteurs pour le R PSVT:R et le MRT (Maeda et al., 2013; Vandenberg & Kuse, 1978).

Nous avons encodé les *verbatim* collectés dans le questionnaire ouvert à partir de stratégies identifiées dans la revue de littérature, en relevant des stratégies globales, comme la rotation mentale, et des étapes constitutives d'une stratégie globale, par exemple 1) la détermination de l'identité et de l'orientation de l'objet, 2) la rotation de l'objet, 3) la comparaison avec sa représentation habituelle et 4) la réponse (Cooper & Shepard, 1973). Nous avons regroupé les étapes constitutives d'une stratégie globale en

stratégies globales chaque fois que possible. Nous avons de plus identifié des observables de mode d'explicitation (p. ex., dessin qui exprime une réponse), de mode de réponse (p. ex., réponse identique à la réponse précédente signalée par idem), de séquences signalées par des marqueurs de séquencement (p. ex., ensuite) et d'articulation de la réflexion (p. ex., j'en déduis). Notre kit d'encodage a été soumis à deux observateurs externes. Il a obtenu des taux d'accord entre 96 % et 98 % qui ont permis de le valider. Une explication détaillée de cette méthodologie est disponible dans nos travaux de thèse (Charles, 2023). Nous avons encodé les réponses choisies dans le QCM selon les stratégies globales issues de la revue de littérature (Chu & Kita, 2008 ; Eme & Marquer, 1998 ; Tartre, 1984).

L'encodage des *verbatim* a permis de calculer le nombre de stratégies différentes déclarées mobilisées dans un test pour les trois questions que nous avons choisies, et de déterminer si les étudiants avaient changé de stratégies entre au moins deux des questions choisies. Les étudiants ayant utilisé une réponse générique aux trois questions, plutôt qu'une réponse spécifique à chaque question, ont été écartés.

Résultats

La performance spatiale

Nous reprenons ici une partie des données issues de nos travaux de thèse : la distribution des scores varie selon les tests, y compris pour les deux tests qui visent la même compétence spatiale, c'est-à-dire le MRT et le R PSVT:R. Comme le montre le tableau 2, la distribution des scores du PSVT:V, du R PSVT:R, du MRT et du MCT ne suit pas la loi normale. Nous observons :

- pour le PSVT:V, un étalement important des scores faibles et moyens, alors que la distribution des scores entre 25 et 30 semble normale;
- pour le R PSVT:R, un étalement important des scores faibles et moyens, alors que la distribution des scores entre 24 et 30 semble normale;
- pour le MRT, un étalement des scores faibles, alors que la distribution des scores entre 8 et 20 semble normale;
- pour le MCT, un étalement des scores faibles, alors que la distribution des scores entre 9 et 25 semble normale.

Tableau 2
Statistiques descriptives et normalité des scores spatiaux (N = 146)

Test	N	Min	Max	M	E-T	W	p
PSVT:V	144	5	30	25,10	5,56	0,75	< 0,001
R P S V T : R	146	8	30	25,31	4,06	0,87	< 0,001
MRT	146	0	20	12,55	4,42	0,96	< 0,001
MCT	146	3	25	16,16	5,13	0,96	< 0,001
CFT	146	22	160	96,52	26,96	0,99	NS

Note. N = nombre d'étudiants présents aux tests; M = moyenne; E-T = écart-type; W = statistique du test de Shapiro-Wilk; p = valeur de p; NS = non significatif.

Autrement dit, les étudiants recueillent majoritairement des scores moyens et élevés pour ces tests, à la différence du CFT, pour lequel la distribution suit la loi normale.

Les stratégies de résolution adoptées dans les tests spatiaux

Les stratégies identifiées dans le questionnaire ouvert

L'encodage des *verbatim* produits en réponse à la première question choisie de chaque test permet de déterminer le nombre d'étudiants déclarant mobiliser la compétence visée par le test, et le nombre d'étudiants déclarant mobiliser une autre stratégie que celle que vise le test pour cette question. Le tableau 3 montre un pourcentage d'étudiants déclarant mettre en œuvre une stratégie autre que celle visée par le test variant de 6% à 65% selon les tests.

Tableau 3
Nombre d'étudiants selon qu'ils déclarent mobiliser les stratégies visées dans les tests

Test	N	Compétence visée	Compétence mobilisée			
			Compétence visée par le test		Autre stratégie	
			n	%	n	%
PSVT:V	145	Changement de point de vue	111	77	34	23
R P S V T : R	144	Rotation mentale	135	94	9	6
MRT	140	Rotation mentale	90	64	50	36
MCT	142	Transformation mentale	73	51	69	49
CFT	142	Dissociation	50	35	92	65

Note. N = nombre d'étudiants dont les réponses ont été traitées; n = pourcentage d'étudiants ayant déclaré mobiliser la stratégie; % = pourcentage d'étudiants ayant déclaré mobiliser la stratégie

Parmi les autres stratégies déclarées mobilisées dans la première question choisie du PSVT:V, qui vise à mesurer la capacité à changer de point de vue, nous relevons la rotation mentale ($N_{RM} = 15 [10\%]$) et des combinaisons de plusieurs stratégies ($N_C = 19 [13\%]$). En ce qui concerne la première question choisie du R PSVT:R, qui vise à mesurer la rotation mentale, $N_{PV} = 2 [1\%]$ étudiants déclarent mobiliser le changement de point de vue et $N_C = 7 [5\%]$ étudiants, une combinaison de stratégies. Pour la première question choisie du MRT, qui vise à mesurer la rotation mentale, $N_{SU} = 32 [23\%]$ étudiants déclarent mobiliser des stratégies uniques, comme le changement de point de vue ou la comparaison à l'aide d'un élément saillant, et $N_C = 18 [13\%]$ étudiants, une combinaison de stratégies. Concernant la première question choisie du MCT, qui vise à mesurer la transformation mentale, $N_{SU} = 41 [29\%]$ étudiants déclarent mobiliser des stratégies uniques, comme le recours à un savoir mathématique ou à une situation de la vie courante, et $N_C = 28 [20\%]$ étudiants une combinaison de stratégies. Finalement, pour la première question choisie du CFT, qui vise à mesurer la dissociation, $N_{SU} = 62 [44\%]$ étudiants déclarent mobiliser des stratégies uniques telles que la rotation mentale ou s'imaginer dessiner, et $N_C = 30 [21\%]$ étudiants, une combinaison de stratégies.

L'encodage des *verbatim* permet de comparer les stratégies mises en œuvre dans trois questions pour chaque test de notre batterie et de déterminer si les étudiants changent de stratégie d'une question à une autre. Nous observons dans le tableau 4 qu'entre 32 % et 62 % des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies selon les tests.

Tableau 4
Nombre d'étudiants déclarant mobiliser plusieurs stratégies dans les verbatim et dans le QCM

Test	Questionnaire ouvert			Questionnaire à choix multiple		
	<i>N</i>	<i>n</i>	%	<i>N</i>	<i>n</i>	%
PSVT:V	143	76	53	144	98	67
R PSVT:R	142	45	32	146	51	35
MRT	138	46	33	142	84	60
MCT	125	77	62	146	85	58
CFT	136	51	37,5	146	52	35,5

Note. *N* = nombre total d'étudiants dont les réponses ont été traitées; *n* = nombre d'étudiants ayant déclaré mettre en œuvre plusieurs stratégies; % = pourcentage d'étudiants ayant déclaré mettre en œuvre plusieurs stratégies.

Les statistiques descriptives du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les cinq tests, décrites dans le tableau 5, indiquent que les étudiants mobilisent en moyenne entre une et deux stratégies par test.

Les stratégies identifiées dans le QCM

L'encodage des réponses choisies dans le QCM permet d'identifier les stratégies mises en œuvre pour chaque test de notre batterie, que cette stratégie soit unique, comme la rotation mentale, ou qu'elle fasse partie d'une combinaison de stratégies, comme la rotation mentale et la dissociation d'un élément intriqué dans un motif complexe. Ce calcul ne permet pas de déterminer si les stratégies sont utilisées de manière isolée ou si elles ne sont pas combinées pour répondre à une question. Par exemple, si l'étudiant a choisi les réponses rotation mentale et dissociation d'un élément intriqué, nous ne pouvons pas déterminer s'il a utilisé la rotation mentale pour une partie des questions et la dissociation pour d'autres, ou s'il a utilisé une combinaison de ces deux stratégies pour l'ensemble des questions ou seulement pour certaines. Nous observons ainsi qu'un pourcentage d'étudiants, variant de 35% à 67% selon le test, déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou une combinaison de stratégies (tableau 4). Les statistiques descriptives du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les cinq tests, décrites dans le tableau 5, indiquent que les étudiants mobilisent entre une et deux stratégies uniques ou combinaisons de stratégies par test en moyenne.

Tableau 5
Statistiques descriptives du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim et dans le QCM

Test	Questionnaire ouvert						Questionnaire à choix multiple					
	N	M	Méd	E-T	Min	Max	N	M	Méd	E-T	Min	Max
PSVT:V	143	1,61	2	0,628	1	3	144	1,8	2	0,65	1	3
R P S V T : R	142	1,35	1	0,533	1	3	146	1,4	1	0,593	1	4
MRT	138	1,39	1	0,597	1	3	146	1,65	2	0,586	1	3
MCT	125	1,83	2	0,759	1	3	146	1,64	2	0,596	1	3
CFT	136	1,43	1	0,605	1	3	142	1,44	1	0,643	1	3

Note. N = nombre d'étudiants dont les réponses ont été traitées; Min = nombre de stratégies le plus faible observé; Max = nombre de stratégies le plus élevé observé; M = moyenne des stratégies observé; E-T = mesure de la dispersion des valeurs; Méd = médiane.

Discussion

Les scores obtenus par notre échantillon décrivent une performance en majorité moyenne à élevée pour quatre tests de notre batterie. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que nos répondants sont des étudiants spécialisés en STIM, c'est-à-dire des étudiants pour lesquels il est probable que les compétences spatiales soient élevées (Wai et al., 2009). Cette remarque ne s'applique cependant pas aux résultats que nous observons pour le CFT, le test visant à mesurer la capacité à isoler un élément intriqué dans un motif complexe. Nous faisons l'hypothèse que les études suivies par notre échantillon n'ont pas mis en œuvre des situations d'apprentissage favorables au développement de cette compétence, que certains étudiants auraient acquise dans certaines pratiques individuelles, comme les loisirs.

Pour l'ensemble des tests de notre batterie, nous constatons dans le tableau 4 que certains étudiants mobilisent plusieurs stratégies, qu'il s'agisse de stratégies uniques ou de combinaisons de stratégies, et que des étudiants changent de stratégies d'une question à une autre. Qu'elles soient uniques ou combinées, les stratégies mises en œuvre ne correspondent pas toujours aux compétences visées par le test. Ainsi, des étudiants font pivoter des objets plutôt que de changer de point de vue pour indiquer à quoi ressemble un objet vu à partir d'un angle différent de celui présenté dans le stimulus dans le PSVT:V, un test visant à mesurer le changement de point de vue. D'autres encore utilisent une combinaison de stratégies pour isoler un élément d'un tout dans le CFT, un test visant à mesurer la compétence de dissociation : ils commencent par déplacer le stimulus dans un motif complexe, pour ensuite tenter de le retrouver dans ce motif. Nous remarquons cependant que, dans le cas du R PSVT:R, qui vise à mesurer la rotation mentale, 94% des étudiants indiquent dans le QCM recourir à la seule rotation mentale pour résoudre les questions qui y sont présentées, et que 90 à 94% d'entre eux disent mobiliser la seule rotation mentale pour les trois questions que nous leur avons proposées.

Les résultats de notre étude confirment ceux observés dans la revue de littérature (Albarete & Aubert, 1996 ; Hegarty, 2018 ; Pilardeau, 2008) pour des étudiants ingénieurs en première année. Ils signalent le fait que la performance aux tests spatiaux ne peut être seulement expliquée par la maîtrise des compétences visées par les tests. Les prises de mesure de performance doivent être accompagnées de protocoles d'investigation des stratégies mises en œuvre dans les tests spatiaux, afin de mieux identifier les compétences

réellement mesurées. La performance spatiale, mesurée à travers ces tests, donne à voir la maîtrise d'une compétence à résoudre des problèmes de nature spatiale, plutôt que la maîtrise d'une compétence spatiale spécifique. Ils invitent donc à la prudence dans l'interprétation des compétences pré-tendument mesurées et questionnent la relation que ces compétences déterminantes entretiennent avec la performance dans la poursuite d'études en STIM (Wai et al., 2009), qu'ils soient utilisés à des fins de sélection (Maeda & Yoon, 2011) ou à des fins de conception et de validation de dispositifs de développement de ces compétences (Martín-Gutiérrez et al., 2015).

Limites et perspectives

L'ordre des tests dans la batterie de tests a été le même pour l'ensemble des étudiants puisqu'une seule prise de performance a été organisée et que les tests ont été limités dans le temps. De ce fait, il est possible que les stratégies et les performances observées dans les tests placés après le premier test aient été affectées par l'effet d'ordre (American Psychological Association, 2018a ; Kinnear et Gray, 2015) : cet apprentissage fortuit dans les tests en début de batterie a pu influencer ceux qui étaient placés à leur suite.

La méthodologie d'analyse de l'activité que nous avons adoptée est limitée à la capacité des étudiants à se représenter et à expliciter des processus cognitifs mobilisés dans l'action (Bloom & Broder, 1950 ; Lemaire, 2015 ; Pilardeau, 2008). Les stratégies que nous avons relevées dans les *verbatim* sont aussi limitées aux trois questions que nous avons choisies pour chaque test. De plus, la liste des stratégies proposées dans le QCM a pu influencer le choix des étudiants (Schwarz & Hippler, 1991).

La validité des protocoles rétrospectifs ayant été établie pour des personnes ne souffrant pas de troubles de la mémoire (Dunlosky & Hertzog, 2001), nous envisageons d'utiliser les stratégies identifiées dans nos travaux pour construire un QCM destiné à identifier les processus cognitifs mis au travail dans les tests spatiaux. Malgré les limites de ces outils que nous avons présentées, il nous semble important de mettre en évidence les compétences mises en œuvre dans les outils de mesure de performance spatiale. Il serait de plus intéressant d'investiguer la relation entretenue entre les stratégies mobilisées et la performance aux items : les items sélectionnés pour le questionnaire ouvert présentant des difficultés de natures différentes, comme le nombre de côtés (Kyllonen et al., 1981), la nature des surfaces (Pellegrino et al., 1985), certaines stratégies sont-elles plus efficaces que d'autres pour résoudre ces différents problèmes ?

Conclusion

Cet article avait pour objectif de présenter une méthodologie de caractérisation des habiletés spatiales d'étudiants ingénieurs en première année, développée dans le cadre du projet e-FRAN EXAPP_3D. Cette approche a permis de montrer que, bien que les tests spatiaux soient conçus pour évaluer une compétence spécifique, ils ne parviennent pas toujours à engager la compétence qu'ils visent à évaluer, autrement dit, qu'ils n'affordent pas suffisamment bien ces habiletés. Ceci semble être moins vrai, dans le cas de notre approche, pour le R PSVT:R, qui présente la double particularité de ne pas être limité dans le temps, et de soumettre des problèmes pour lesquels il n'est pas possible de seulement comparer les stimuli avec les réponses possibles. L'affordance due à la nécessité d'appliquer une rotation mentale à un exemple avant de l'appliquer à un stimulus semble suffisamment robuste pour éviter les stratégies de contournement et produire une performance révélatrice de la compétence visée. Cette affordance de la question semble l'emporter sur celle de l'absence de limite de temps ou, dans notre cas, d'une allocation d'un temps de réponse généreux, qui permet la mise en œuvre d'un nombre accru de stratégies (Schwartz, 1963). Nos résultats invitent à reconsidérer l'usage qui est fait de ces tests pour identifier des apprenants dont le niveau de performance spatiale est estimé révélateur de la maîtrise, ou de l'absence de maîtrise, de compétences spatiales spécifiques, ou autrement dit, pour confondre performance et compétence.

Révision linguistique : Marie-Claire Legaré

Mise en page : Emmanuel Gagnon

Résumé en portugais : Eusébio André Machado

Réception : 22 mai 2023

Version finale : 31 octobre 2024

Acceptation : 25 février 2025

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Albaret, J. M. & Aubert, E. (1996). Étalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg. *EVOLUTIONS psychomotrices*, 8(34), 269-278.
- American Psychological Association. (2018a). Order effect. *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/order-effect>
- American Psychological Association. (2018b). Performance. *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/performance>
- American Psychological Association. (2018c). Performance test. *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/performance-test>
- American Psychological Association. (2018d). Strategy. *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/strategy>
- Ault, H. K. & John, S. (2010). Assessing and Enhancing Visualization Skills of Engineering Students in Africa: A Comparative Study. *Engineering Design Graphics Journal*, 74(2), 12-20.
- Barratt, E. S. (1953). An analysis of verbal reports of solving spatial problems as an aid in defining spatial factors. *The Journal of Psychology*, 36, 17-25.
- Bloom, B. S. & Broder, L. J. (1950). Problem-solving processes of college students. *Supplementary Educational Monographs*, B, 1-109.
- Branoff, T. (2000). Spatial Visualization Measurement: A Modification of the Purdue Spatial Visualization Test - Visualization of Rotations. *Engineering Design Graphics Journal*, 64(2), 14-22.
- Branoff, T. & Dobelis, M. (2012). The Relationship between Spatial Visualization Ability and Students' Ability to Model 3D Objects from Engineering Assembly Drawings. *Engineering Design Graphics Journal*, 76(3), 37-43.
- Caissie, A. F., Vigneau, F. & Bors, D. A. (2009). What does the Mental Rotation Test Measure? An Analysis of Item Difficulty and Item Characteristics. *The Open Psychology Journal*, 2(1), 94-102. <https://doi.org/10.2174/1874350100902010094>
- Charles, S. (2023). *Habileté spatiale et stratégies de modélisation 3D* [Thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université]. <https://hal.science/tel-04097396>
- Charles, S., Jaillet, A., Peyret, N., Jeannin, L. & Rivière, A. (2019). Exploring the relationship between spatial ability, individual characteristics and academic performance of first-year students in a French engineering school. *47th SEFI Annual Conference Proceedings* (p. 235-248). https://www.sefi.be/wp-content/uploads/2019/10/SEFI2019_Proceedings.pdf
- Chu, M. & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(4), 706-723. <https://doi.org/10.1037/a0013157>
- Cohen, C. A. & Hegarty, M. (2007). Sources of Difficulty in Imagining Cross Sections of 3D Objects. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (p. 179-184).
- College Entrance Examination Board. (1939). *Special Aptitude Test in Spatial Relations (Mental Cutting Test)*. College Entrance Examination Board.

- Cooke-Simpson, A. & Voyer, D. (2007). Confidence and gender differences on the Mental Rotations Test. *Learning and Individual Differences*, 17(2), 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2007.03.009>
- Cooper, L. A. & Mumaw, R. J. (1985). Spatial Aptitude. Dans R. F. Dillon (dir.), *Individual Differences in Cognition* (vol. 2, p. 67-94). Academic Press.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. Dans W. G. Chase (dir.), *Visual Information Processing* (p. 75-176). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-170150-5.50009-3>
- Dunlosky, J. & Hertzog, H. (2001). Measuring strategy production during associative learning: The relative utility of concurrent versus retrospective reports. *Memory & Cognition*, 29(2), 247-253.
- Ekstrom, R. B., French, J. W., Harman, H. H. & Dermen, D. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests* (6^e éd.). Educational Testing Service.
- Eliot, J. (1983). Historical background. *An international directory of spatial tests* (p. 1-10). NFER-Nelson.
- Eliot, J. (1987). *Models of Psychological Space: Psychometric, Developmental, and Experimental Approaches*. Springer-Verlag.
- Eliot, J. & Macfarlane Smith, I. (1983). *An international directory of spatial tests*. NFER-Nelson.
- Eme, P. E. & Marquer, J. (1998). Quantitative and qualitative individual differences in visual comparison processing: are strategies only analytic or holistic? *Personality and Individual Differences*, 25(3), 459-475. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(98\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(98)00049-X)
- French, J. W. (1965). The Relationship of Problem-Solving Styles to the Factor Composition of Tests. *Educational and Psychological Measurement*, 25(1), 9-28. <https://doi.org/10.1177/001316446502500102>
- Galton, F. (1883). *Inquiries into human faculty and its development* (éd. 2001). Gavan Tredoux. <http://galton.org/books/human-faculty/text/human-faculty.pdf>
- Geronimi, A., De Vries, E., Prudhomme, G. & Baille, J. (2005). Objets intermédiaires dans une situation de conception en technologie avec CAO au collège. *Aster*, 41, 115-137. <https://doi.org/10.4267/2042/8869>
- Gibson, J. J. (2015). *The Ecological Approach to Visual Perception* (Classic Edition). Psychology Press.
- Guay, R. B. (1976a). *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views*. Purdue Research Foundation.
- Guay, R. B. (1976b). *Purdue Spatial Visualization Test: Rotations*. Purdue Research Foundation.
- Guay, R. B. (1980, avril). *Spatial Ability Measurement: A Critique and an Alternative* [communication]. Annual Meeting of the American Educational Research Association, Boston, Etats-unis d'Amérique.
- Guay, R. B. & McDaniel, E. D. (1976). *The visualization of viewpoints*. Purdue Research Foundation.
- Guay, R. B., McDaniel, E. D. & Angelo, S. (1978). Analytic factor confounding spatial ability measurement. Dans R. B. Guay & E. McDaniel (dir.), *Correlates of performance on spatial aptitude tests* (p. 116-128). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

- Hamon, C. (2009). Graphismes techniques : tâches, nature et causes des difficultés des apprenants. *Aster*, 48, 39-62. <https://doi.org/10.4267/2042/30420>
- Hegarty, M. (2010). Components of Spatial Intelligence. Dans B. H. Ross (dir.), *Psychology of Learning and Motivation* (vol. 52, p. 265-297). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)52007-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)52007-3)
- Hegarty, M. (2018). Ability and sex differences in spatial thinking: What does the mental rotation test really measure? *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(3), 1212-1219. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1347-z>
- Hegarty, M. & Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2), 175-191.
- Hopkins, K. D. (1998). *Educational and Psychological Measurement and Evaluation* (8^e éd.). Allyn & Bacon.
- Kelly Jr, W. F. (2013). *Measurement of Spatial Ability in an Introductory Graphic Communications Course* [Thèse de doctorat, North Carolina State University].
- Kinnear, P. & Gray, C. (2015). *SPSS facile appliquée à la psychologie et aux sciences sociales: Maîtriser le traitement des données*. De Boeck.
- Kozhevnikov, M. & Hegarty, M. (2001). A dissociation between object manipulation spatial ability and spatial orientation ability. *Memory & Cognition*, 29(5), 745-756. <https://doi.org/10.3758/BF03200477>
- Kyllonen, P. C., Woltz, D. J. & Lohman, D. F. (1981). *Models of Strategy and Strategy-Shifting in Spatial Visualization Performance*. (rapport technique n° 17). School of Education, Stanford University. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA108003>
- Leclercq, D. (2006). *L'évolution des QCM*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/10124>
- Lemaire, P. (2015). *Vieillissement cognitif et adaptations stratégiques* (1^{re} éd.). De Boeck Supérieur.
- Leplat, J. (2004). L'analyse psychologique du travail. *European Review of Applied Psychology*, 54(2), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2003.12.006>
- Lieu, D. K. & Sorby, S. A. (2009). *Visualization, modeling, and graphics for engineering design* (1^{re} éd.). Delmar, Cengage Learning.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis. *Child Development*, 56(6), 1479-1498. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1130467>
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial Ability: A Review and Reanalysis of the Correlational Literature*. (rapport technique n° 8). Stanford University, School of Education. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA075972>
- Lohman, D. F. (1993). *Spatial Ability and G* [communication]. Spearman Seminar, University of Plymouth. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.7385&rep=rep1&type=pdf>
- Lohman, D. F. & Kyllonen, P. C. (1983). Individual Differences in Solution Strategy on Spatial Tasks. Dans R. F. Dillon et R. R. Schmeck (dir.), *Individual Differences in Cognition* (vol. 1, p. 105-135). Academic Press.
- Lohman, D. F., Pellegrino, J. W., Alderton, D. L. & Regian, J. W. (1987). Dimensions and Components of Individual Differences in Spatial Abilities. Dans S. H. Irvine et S. E. Newstead (dir.), *Intelligence and Cognition: Contemporary Frames of Reference* (p. 253-312). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9437-5_6

- Maeda, Y. & Yoon, S. Y. (2011, juin). *Scaling the Revised PSVT-R: Characteristics of the first-year engineering students' spatial ability* [communication]. 118th American Society for Engineering Education (ASEE) Annual Conference and Exposition, Vancouver, Canada. <https://doi.org/10.13140/2.1.2600.2881>
- Maeda, Y., Yoon, S. Y., Kim-Kang, G. & Imbrie, P. K. (2013). Psychometric Properties of the Revised PSVT:R for Measuring First Year Engineering Students' Spatial Ability. *International Journal of Engineering Education*, 29(3), 763-776.
- Maier, P. H. (1996). Spatial geometry and spatial ability—How to make solid geometry solid. *Selected papers from the Annual Conference of Didactics of Mathematics* (p. 63-75).
- Martín-Gutiérrez, J., Contero, M. & Alcañiz, M. (2015). Augmented Reality to Training Spatial Skills. *Procedia Computer Science*, 77, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.356>
- Martín-Gutiérrez, J., Gil, F. A., Contero, M. & Saorín, J. L. (2013). Dynamic three-dimensional illustrator for teaching descriptive geometry and training visualisation skills. *Computer Applications in Engineering Education*, 21(1), 8-25. <https://doi.org/10.1002/cae.20447>
- McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5), 889-918. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.5.889>
- Metz, S. S., Sorby, S. A. & Jarosewich, T. (2016). Spatial Skills Training Impacts Retention of Engineering Students - Does This Success Translate to Community College Students in Technical Education? *Proceedings of the 2016 ASEE Annual Conference & Exposition*. <https://www.asee.org/public/conferences/64/papers/15339/view>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique et Commissariat général à l'Investissement. (2016). *Investissements d'avenir : 22 projets lauréats de l'action "e-FRAN" pour le développement de territoires éducatifs d'innovation numérique* [communiqué de presse]. https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2016/09/23092016_dp_presentation_des_laureats_e-fran.pdf
- Necker, L. A. (1832). LXI. Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1(5), 329-337. <https://doi.org/10.1080/14786443208647909>
- Onyancha, R. M., Derov, M. & Kinsey, B. L. (2009). Improvements in Spatial Ability as a Result of Targeted Training and Computer-Aided Design Software Use: Analyses of Object Geometries and Rotation Types. *Journal of Engineering Education*, 98(2), 157-167. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2009.tb01014.x>
- Pellegrino, J. W., Mumaw, R. J. & Shute, V. J. (1985). Analyses of spatial aptitude and expertise. Dans S. E. Embretson (dir.), *Test design: Developments in psychology and psychometrics* (p. 45-76). Academic Press.
- Pilardeau, M. (2008). *Identification et validation des stratégies dans une tâche de rotation d'image mentale* [Thèse de doctorat, Université Paris Descartes].
- Salmani Nodushan, A. M. (2021). Test Affordances or Test Function? Did We Get Messick's Message Right? *International Journal of Language Studies*, 15(3), 127-140.
- Schwartz, P. A. (1963). Adapting tests to the cultural setting. *Educational and Psychological Measurement*, 23(4), 673-686.

- Schwarz, N. & Hippler, H.-J. (1991). *Response alternatives: the impact of their choice and presentation order.* (ZUMA-Arbeitsbericht, 1990/08). Mannheim: Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen -ZUMA-. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-67257>
- Sorby, S. A. & Veurink, N. (2010). Long-term Results from Spatial Skills Intervention among First-year Engineering Students. *Proceedings of the 65th Midyear Meeting of the Engineering Design Graphics Division of ASEE* (p. 10).
- Steinhauer, H. M. (2012). Correlation Between a Student's Performance on the Mental Cutting Test and Their 3D Parametric Modeling Ability. *Engineering Design Graphics Journal*, 76(3), 44-48.
- Tartre, L. A. (1984). *The Role of Spatial Orientation Skill in the Solution of Mathematics Problems and Associated Sex-Related Differences.* [Thèse de doctorat, University of Wisconsin-Madison].
- Tartre, L. A. (1990). Spatial skills, gender, and mathematics. Dans E. Fennema et G. C. Leder (dir.), *Mathematics and gender* (p. 27-59). Teachers College Press.
- Thurstone, L. L. (1938). The perceptual factor. *Psychometrika*, 3(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/BF02287914>
- Thurstone, L. L. & Jeffrey, T. E. (1956). *Closure Flexibility (Concealed Figures) Test - Form A.* Industrial Relations Center - The University of Chicago.
- Thurstone, L. L. & Jeffrey, T. E. (1965). *Closure Flexibility (Concealed figures) Test administration Manual.* Industrial Relations Center - The University of Chicago.
- Tsutsumi, E., Shiina, K., Suzuki, A., Yamanouchi, K., Saito, T. & Suzuki, K. (1999). A mental cutting test on female students using a stereographic system. *Journal for Geometry and Graphics*, 3(1), 111-119.
- Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C. & Newcombe, N. S. (2013). The Malleability of Spatial Skills: A Meta-Analysis of Training Studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352-402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
- Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental Rotations, a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599-604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>
- 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(4), 817-835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. *Psychologische Forschung*, 4(1), 301-350. <https://doi.org/10.1007/BF00410640>
- Workman, J. E., Caldwell, L. F. & Kallal, M. J. (1999). Development of a Test to Measure Spatial Abilities Associated with Apparel Design and Product Development. *Clothing and Textiles Research Journal*, 17(3), 128-133. <https://doi.org/10.1177/0887302X9901700303>
- Yoon, S. Y. (2011). *Psychometric properties of the Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations (the Revised PSVT:R)* [Thèse de doctorat, Purdue University]. <https://search.proquest.com/openview/e5c5ec5addee291928859d5158fa37e20/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>

Yoon, S. Y. & Mann, E. L. (2017). Exploring the Spatial Ability of Undergraduate Students: Association with Gender, STEM Majors, and Gifted Program Membership. *Gifted Child Quarterly*, 61(4), 313-327. <https://doi.org/10.1177/0016986217722614>

Yue, J. (2006). Spatial Visualization by Isometric Drawing. Dans *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference* (vol. 3).