



## **Éléments de mesure de la compétence de visualisation spatiale d'étudiants ingénieurs en mécanique**

Sophie Charles, Alain Jaillet, Nicolas Peyret, Laurent Jeannin, Alain Rivière

### **► To cite this version:**

Sophie Charles, Alain Jaillet, Nicolas Peyret, Laurent Jeannin, Alain Rivière. Éléments de mesure de la compétence de visualisation spatiale d'étudiants ingénieurs en mécanique. 2019. <hal-03346657>

**HAL Id: hal-03346657**

**<https://hal.science/hal-03346657v1>**

Submitted on 16 Sep 2021

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

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



HAL Authorization

# Éléments de mesure de la compétence de visualisation spatiale d'étudiants ingénieurs en mécanique

S. CHARLES<sup>a</sup>, A. JAILLET<sup>b</sup>, N. PEYRET<sup>c</sup>, L. JEANNIN<sup>d</sup> & A. RIVIÈRE<sup>e</sup>

a. Laboratoire Bonheurs, EA 7517 [sophie.charles@supmeca.fr](mailto:sophie.charles@supmeca.fr)

b. Laboratoire Bonheurs, EA 7517 [alain.jaillet@u-cergy.fr](mailto:alain.jaillet@u-cergy.fr),

c. Laboratoire Quartz, SUPMECA EA7393 [nicolas.peyret@supmeca.fr](mailto:nicolas.peyret@supmeca.fr)

d. Laboratoire Bonheurs, EA 7517 [laurent.jeannin@u-cergy.fr](mailto:laurent.jeannin@u-cergy.fr),

e. Laboratoire Quartz, SUPMECA EA7393 [alain.riviere@supmeca.fr](mailto:alain.riviere@supmeca.fr)

## Résumé :

*Dans le cadre du projet e-FRAN EXAPP\_3D, qui vise notamment à mieux comprendre l'utilisation d'outils numériques de conception, modélisation et simulation 3D à différents niveaux d'études et par différents publics, ce travail de recherche porte sur la visualisation spatiale et ses possibles inférences en matière d'habileté dans les études d'ingénierie. La visualisation spatiale est un composant de l'habileté spatiale, qui prédit les choix et la réussite dans les études et les professions dans le domaine des sciences, technologie, ingénierie et mathématiques (Wai, Lubinski & Benbow, 2009). La visualisation spatiale peut à son tour être subdivisée en deux nouvelles compétences, soit la rotation mentale et la transformation mentale (Kersh & Cook, 1979, cités par Tartre, 1990), qui peuvent être mesurée grâce à des tests papier. En septembre 2018, le Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations (Yoon, 2011) et le Mental Rotation Test (Vandenberg & Kuse, 1978), qui visent à mesurer la rotation mentale, et le Mental Cutting Test (CEEB, 1939), qui vise à mesurer la transformation mentale, ont été administrés à environ 135 étudiants en première année d'école d'ingénieurs en mécanique, afin d'évaluer leur compétence de visualisation spatiale. Les étudiants intègrent Supméca sur concours après avoir suivi une classe préparatoire, une Licence 2 ou une Licence 3, ou obtenu un brevet de technicien supérieur ou un diplôme universitaire technique. En complément, une partie des notes individuelles du premier semestre d'enseignement a été recueillie. L'étude de la relation entre la performance aux tests spatiaux et la performance académique des étudiants a révélé le pouvoir prédictif de ces tests dans les évaluations portant sur l'analyse des mécanismes, l'algorithmique et la programmation en langage C, et les mathématiques appliquées. La malléabilité des compétences spatiales étant établie (Uttal et al., 2013), des dispositifs de remédiation pour favoriser l'apprentissage et la performance des étudiants sont envisageables (Sorby, 2005).*

## Abstract :

*This study is concerned with spatial visualisation and its possible inferences as a necessary ability in French engineering education, and is completed as part of a French research programme, which aims at better understanding how multi-purpose 3-D modelling software is used by learners at different levels of schooling. Spatial visualisation is one of the components of spatial ability (McGee, 1979; Tartre, 1990; Uttal, Meadow, Tipton, Hand, Alden, Warren & Newcombe, 2013), which predicts choices and success in Science, Technology, Engineering, and Maths disciplines and professions (Wai,*

Lubinski & Benbow, 2009). *Spatial visualisation can be further developed into mental rotation and mental transformation (Kersh & Cook, 1979, as cited in Tartre, 1990). In order to evaluate the spatial visualisation skills of first-year students in a French engineering school specialised in Mechanics, the Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations (Yoon, 2011), the Mental Rotation Test (Vandenberg & Kuse, 1978), which both aim at measuring mental rotation, and the Mental Cutting Test (CEEB, 1939), which aims at measuring mental transformation, were administered to around 135 freshmen in September 2018. In the French Grande Ecole system, engineering students are recruited after a two-year preparation, which is equivalent to the first two years of a degree course. This data collection was completed with a selection of demographics and academic assessment scores. An analysis of variance revealed these spatial tests are significant predictors of the students' success in mechanism analysis, Algorithmics and Applied mathematics. Given the malleability of spatial skills (Uttal et al., 2013), these findings open the way for remedial courses, which could increase students' learning and success in engineering courses (Sorby, 2005).*

**Mots clefs : habileté spatiale, performance académique, 3D, caractéristiques individuelles**

## 1 Introduction

Dans le cadre du projet e-FRAN<sup>1</sup> EXAPP\_3D, qui vise notamment à mieux comprendre l'utilisation d'outils numériques de conception, modélisation et simulation 3D à différents niveaux d'études et par différents publics, ce travail de recherche porte sur la visualisation spatiale et ses possibles inférences en matière d'habileté dans les études d'ingénierie. Cette compétence est un élément de l'habileté spatiale, dont le lien avec le succès en études d'ingénierie a été établi (Wai, Lubinski, & Benbow, 2009). Elle est aussi liée aux pratiques individuelles (Gold *et al.*, 2018), ainsi qu'aux caractéristiques individuelles (Linn & Petersen, 1985). Ce travail propose d'étudier si la visualisation spatiale, mesurée au travers de tests papier, est liée à la performance académique d'étudiants en première année d'école d'ingénieurs spécialisée en mécanique.

## 2 Cadre de la recherche

La résolution de problèmes de nature scientifique ou technologique repose sur le raisonnement spatial (Stieff & Uttal, 2015). Les capacités spatiales sont un élément déterminant dans le développement d'une expertise en Sciences, Technologie, Ingénierie et Mathématiques (STIM) (Sorby, Casey, Veurink, & Dulaney, 2013). Ces disciplines nécessitent de visualiser, manipuler ou comprendre des formes en Deux Dimensions (2D) et en Trois Dimensions (3D). Ainsi, les étudiants chimistes analysent la structure spatiale des molécules, les étudiants en médecine apprennent l'anatomie, et les étudiants ingénieurs modélisent des objets en 3D à partir de représentations en 2D ou analysent des mécanismes à partir de représentations en 3D et en 2D. Deux études longitudinales menées aux États-Unis d'Amérique ont établi que ces compétences influencent le choix des étudiants pour les études et les professions liées à ces disciplines (Shea, Lubinski, & Benbow, 2001; Wai *et al.*, 2009).

---

<sup>1</sup> Les projets Espaces de formation, de recherche et d'animation numérique (e-FRAN) visent « à soutenir des projets de transformation de l'École qui traduisent la volonté des acteurs de l'éducation et de leurs partenaires de créer des "territoires éducatifs d'innovation numérique" en prenant appui sur la recherche » (<https://www.education.gouv.fr/cid94346/appele-a-projet-e-fran.html>).

Dans leur étude, Shea, Lubinski et Benbow (2001) ont suivi 321 sujets américains ayant obtenu les scores les plus élevés aux tests scolaires *Scholastic Assessment Test Mathematics and Verbal* (Educational Testing Service, 1948) et aux tests spatiaux *Differential Aptitude Test Space Relations and Mechanical Reasoning* (Bennett, Seashore, & Wesman, 1973) à l'âge de treize ans. Ces scores représentaient les 0,5% les plus élevés. Ces mesures ont été complétées par des questionnaires auxquels les sujets ont indiqué les matières qu'ils préféraient et celles qu'ils appréciaient le moins au lycée à l'âge de dix-huit ans, leur spécialisation en premier cycle universitaire et en troisième cycle universitaire à l'âge de vingt-trois ans, et leur profession à l'âge de trente-trois ans. Les auteurs en ont conclu qu'il était plus probable que les adolescents ayant démontré une habileté spatiale plus élevée qu'une habileté verbale à l'âge de treize ans et qui avaient déclaré que les mathématiques étaient leur matière préférée au lycée soient engagés dans les domaines de l'ingénierie, de l'informatique et des mathématiques vingt ans plus tard.

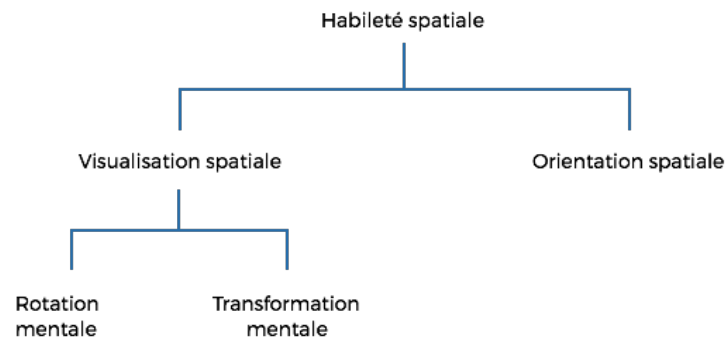
Wai, Lubinski et Benbow (2009) ont suivi l'évolution de 306 665 sujets issus du *Project Talent* (Flanagan *et al.*, 1961). Dans le cadre de ce projet, les répondants ont été évalués sur leur compétences verbales, mathématiques et spatiales, leurs connaissances en art, biologie, ingénierie, journalisme et sciences physiques, et ont été interrogés sur leur goûts en 1960, alors qu'ils étaient lycéens. Ils ont ensuite été suivis pendant les onze années qui ont suivi leur départ à la fin du lycée. Les auteurs ont constaté que la probabilité d'obtenir une qualification avancée en STIM, soit un doctorat ou un master, augmente en fonction de l'habileté spatiale et que d'autre part, les sujets qui occupaient des fonctions dans les domaines des STIM avaient atteint des scores en habileté spatiale plus élevés que les autres sujets lorsqu'ils étaient au lycée.

## 2.1 L'habileté spatiale

Souvent décrite comme une liste de facteurs la composant, l'habileté spatiale est rarement définie comme une entité. Quelques auteurs proposent une définition unique : Linn et Peterson (1985) la décrivent comme « *skill in representing, transforming, generating and recalling symbolic, nonlinguistic information* » (Linn & Petersen, 1985, p. 1482), Lohman fait état d'une capacité à « *generate, retain, retrieve, and transform well-structured visual images* » (Lohman, 1993, p. 3) et Carroll mentionne « *individuals' abilities in searching the visual field, apprehending the forms, shapes, and positions of objects as visually perceived, forming mental representations of those forms, shapes, and positions, and manipulating such representations 'mentally'* » (Carroll, 1993, p. 304). Dans les trois descriptions, il s'agit de créer, transformer et reconnaître des formes et des objets mentalement.

Parmi ceux identifiés par la littérature, les facteurs les plus fréquemment cités sont la visualisation spatiale (Carroll, 1993; Connor & Serbin, 1980; Duroisin, 2015; French, 1951; Linn & Petersen, 1985; Lohman, 1988; Maier, 1996; McGee, 1979; Michael, Guilford, Fruchter, & Zimmerman, 1957; Tartre, 1990; Thurstone, 1950) et l'orientation spatiale (Connor & Serbin, 1980; Duroisin, 2015; French, 1951; Lohman, 1988; Maier, 1996; McGee, 1979; Tartre, 1990; Thurstone, 1950). Notre étude portant sur la visualisation spatiale, l'orientation spatiale n'y sera pas détaillée.

Figure 1 – Classification des compétences spatiales (Adapté de Tartre, 1990, Figure 3.1)



## 2.2 La visualisation spatiale

La visualisation spatiale, telle que définie par McGee (1979), implique « *the ability to mentally rotate, manipulate, and twist two- and three-dimensional stimulus objects* » (McGee, 1979, p. 896). Cette compétence mobilise la manipulation mentale d'objets (R. B. Guay, 1980; Hegarty & Waller, 2004; Tartre, 1990) selon un cadre de référence extérieur au sujet, c'est-à-dire un cadre de référence dans lequel la position du corps du sujet est fixe (Hegarty & Waller, 2004).

Kersh et Cook (1979, cités par Tartre, 1990) décomposent la visualisation spatiale en deux catégories, soit la rotation mentale et la transformation mentale. Les auteurs justifient cette distinction par la taille de la transformation d'un objet : elle est partielle, dans le cas de la transformation mentale, et totale, dans le cas de la rotation mentale.

### 2.2.1 La rotation mentale

Selon Hoyek, Collet et Guillot, la rotation mentale est « la capacité à faire tourner mentalement l'image d'un objet en 2 ou 3 dimensions » (Hoyek, Collet, & Guillot, 2010, p. 29). Le terme rotation mentale est mentionné pour la première fois par Shepard et Metzler à partir d'une expérience qu'ils ont menée en 1971 : ils ont demandé à huit sujets adultes de décider si deux dessins en perspective d'objets en 3D, présentés avant et après avoir subi une rotation, étaient similaires. Le test inclut différents types de rotations : les rotations « *in the picture plane* » (Shepard & Metzler, 1971, p. 702) sont effectuées autour d'un axe passant par le centre du cercle et normal au plan de l'image, comme illustré dans la Figure 2A. Les rotations « *in depth* » (Shepard & Metzler, 1971, p. 702) sont effectuées autour d'un axe passant par le centre du cercle et appartenant au plan de l'image, comme illustré dans la Figure 2B. Les chercheurs ont constaté une augmentation linéaire du temps de réponse au fur et à mesure que la différence angulaire de rotation croissait, et une augmentation du temps de réponse pour les paires présentant une rotation dont l'axe appartient au plan de l'image, comparé à celui nécessaire pour une rotation selon un axe normal au plan de l'image (Shepard & Metzler, 1971).

Figure 2 – Exemples de paires de dessins d'un objet pivoté selon une rotation autour d'un axe normal au plan (A) et appartenant au plan (B) (Shepard & Metzler, 1971, Figure 1)

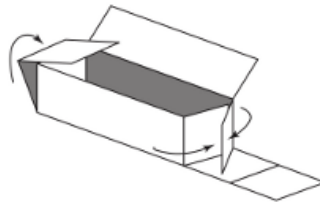


## 2.2.2 La transformation mentale

Cette capacité implique « *different operations on separate parts of the mental image* » (Kersh & Cook, 1979, p. 8, cités par Tartre, 1990, p. 31). Tartre (1990) distingue quatre catégories :

- la transformation d'une image en 2D vers une image en 2D, à la manière d'un tangram mental ;
- la transformation d'une image en 2D vers une image en 3D, comme lorsque l'on doit plier mentalement un patron pour former un objet en 3D, illustrée dans la Figure 3 ;
- la transformation d'une image en 3D vers une image en 3D, telle la construction mentale d'un solide à partir de plusieurs solides;
- la transformation d'une image en 3D vers une image en 2D, comme lorsque l'on déplie mentalement un papier, illustrée dans la Figure 3.

Figure 3 – Exercice Boîte à cube (Petitjean et al., 2012)



## 2.3 Comment mesurer la visualisation spatiale ?

Il existe de nombreux tests papier visant à mesurer l'habileté spatiale : Eliot et Smith en présentent 392 dans leur *International Directory of Spatial Tests* (Eliot & Smith, 1983). Dans son travail de thèse, Kelly Jr mentionne une liste de vingt-quatre tests comme étant ceux les plus cités dans les études portant sur l'enseignement du dessin industriel (Kelly Jr, 2013). L'auteur interroge les membres de l'*Engineering Design Graphics Division*<sup>2</sup> sur leurs préférences. Ceux-ci se prononcent pour le *Mental Rotation Test* (Vandenberg & Kuse, 1978), le *Special Aptitude - Spatial Relations*, plus communément nommé *Mental Cutting Test* (College Entrance Examination Board, 1939), et le *Purdue Spatial Visualization Test : Visualization of Rotations* (Guay, 1977). Ce choix corrobore l'analyse comparative internationale réalisée par Ault et John (2010). Une description de chacun de ces tests est présentée ci-dessous.

### 2.3.1 Tests papier mesurant la rotation mentale

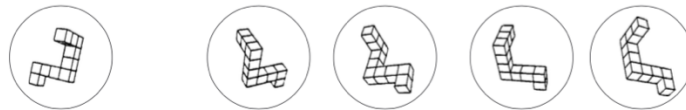
À partir des travaux de Shepard et Metzler (1971), Vandenberg et Kuse créent un test papier à choix multiple comportant vingt questions (Vandenberg & Kuse, 1978). Il existe une version comportant vingt-quatre questions utilisée dans plusieurs études (Caissie, Vigneau, & Bors, 2009; Peters *et al.*, 1995). Pour chaque problème, une forme de référence est donnée et le sujet doit trouver les deux formes qui lui correspondent parmi les quatre proposées. Les rotations sont effectuées selon une symétrie centrale. Chaque stimulus correspond à une vue isométrique d'un objet en 3D. Pour la moitié de l'épreuve, les distracteurs sont des images en miroir pivotées du stimulus, et pour l'autre, des images pivotées d'une ou de deux réponses proposées. Les auteurs précisent que la correction s'effectue en allouant un point pour deux réponses correctes et aucun point pour une réponse correcte

---

<sup>2</sup> L'*Engineering Design Graphics Division* a été fondée en 1928 et est la division la plus ancienne de l'*American Society for Engineering Education*. Ses membres sont ou ont été impliqués dans formation académique ou professionnelle des ingénieurs (<https://sites.asee.org/edgd/>).

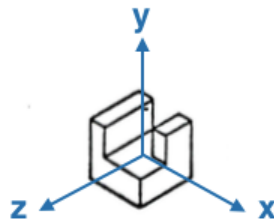
ou aucune réponse correcte. Ce barème vise à empêcher les sujets de deviner les réponses. Le test est administré en deux parties dissociées par une pause. Kuse indique que le temps alloué aux limites de temps de l'épreuve et de la pause dépend de la batterie de tests utilisée et de l'expérience des sujets interrogés (A.R. Kuse, communication personnelle, 25 juin 2018). *L'International Directory of Spatial Tests* indique une durée de dix minutes (Eliot & Smith, 1983). Albaret et Aubert (1996) proposent une version française des instructions.

Figure 4 – Exemple de questions issues du MRT (Vandenberg & Kuse, 1978)



Le *Purdue Spatial Visualization Test : Visualization of Rotations* (PSVT:R) figure aussi parmi les trois tests les plus utilisés pour mesurer l'habileté spatiale (Ault & John, 2010; Kelly Jr, 2013). Yue (2006) explique sa popularité par la simplicité de son format : les représentations des objets sont des dessins isométriques. Ce test à choix unique comporte trente questions présentant un objet en 3D dans une première position, puis dans une seconde. Les instructions indiquent que le sujet doit identifier la séquence de rotations suivie par l'objet, la mémoriser pour l'appliquer à un deuxième objet et identifier la bonne réponse parmi les cinq proposées. Le test comporte trente questions et le temps de réponse est limité à vingt minutes (Guay, 1980). Les rotations sont réalisées selon des multiples de 90°, selon une symétrie axiale, suivant les directions principales de la pièce si on pose un repère direct, comme illustré dans la Figure 5. Les objets présentent des surfaces planes, inclinées ou non, obliques et cylindriques.

Figure 5 – Exemple de forme issue du PSVT:R (R. Guay, 1977)

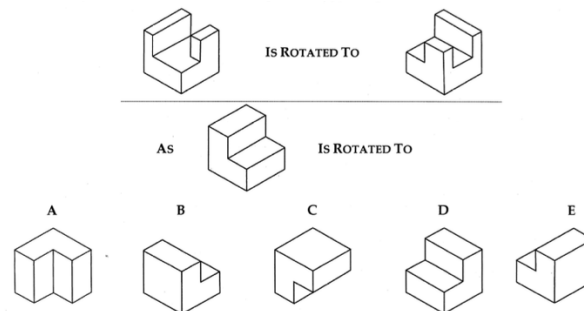


Guay précise que le test a été conçu comme instrument de recherche dans le but de mesurer la visualisation spatiale (Guay, 1980). Dans leur article décrivant les modifications apportées au PSVT:R pour en faire un test plus court, le *Purdue Visualization of Rotations Test* (ROT) (Bodner & Guay, 1997), Bodner et Guay déclarent que le PSVT:R nécessite « *mental operations on the mental representation of the object that are more analogous to manipulations of the three-dimensional object being represented than the two-dimensional drawings which are actually presented* » (Bodner & Guay, 1997, p. 8-9). Selon la définition de la visualisation spatiale de McGee, qui associe cette compétence notamment à la manipulation ou la rotation mentale d'objets (1979), le processus cognitif mesuré par ce test peut être associé à la visualisation spatiale, et selon la distinction de Kersh et Cook (1979), qui associent cette capacité à la transformation totale d'un objet, il peut être associé à la rotation mentale. Maeda, Yoon, Kim-Kang & Imbrie affirment que ce test mesure la rotation mentale en 3D (Maeda, Yoon, Kim-Kang & Imbrie, 2013).

Le *Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations* (Yoon, 2011) est le fruit du travail de révision du PSVT:R effectué par Yoon en 2011, avec la permission de Guay. Il a consisté à éliminer les erreurs de représentation dues au recours à des représentations 3D par perspective isométrique (Yue, 2006, 2008), à revoir la mise en page pour ne présenter qu'une question par page et à unifier la taille des objets présentés (Maeda, Yoon, Kim-Kang, & Imbrie, 2013). Le temps de

passage de l'épreuve est illimité et les questions sont organisées par ordre de difficulté croissante. Le test s'adresse à des sujets âgés de treize ans et plus (Maeda & Yoon, 2016).

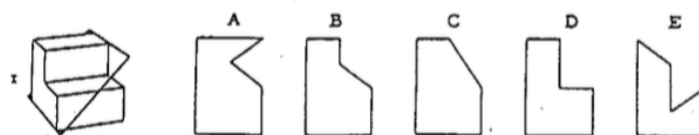
Figure 6 – Exemple de question issue du R PSVT:R (Yoon, 2011)



### 2.3.2 Tests papier mesurant la transformation mentale

Le troisième test le plus fréquemment cité est le *Special Aptitude test in Spatial Relations*, plus communément nommé *Mental Cutting Test* (MCT). Chaque question présente un solide en 3D et un plan de coupe le traversant. Le sujet doit alors choisir la réponse présentant la coupe transversale résultante parmi les cinq choix proposés. Le test, limité à vingt minutes, comporte vingt-cinq questions réparties en deux catégories : une partie des questions est résolue en identifiant la forme de la section, l'autre en identifiant la forme de la section et en tenant compte des mesures, notamment des segments et des angles (Tsutsumi *et al.*, 1999). Ces choix peuvent s'effectuer en transformant mentalement un objet en 3D représenté par une vue isométrique en une forme en 2D. Ce test est décrit avoir été conçu comme mesure de l'aptitude « *in making and manipulating three-dimensional mental images* » (Tsutsumi *et al.*, 1999, p. 111). Cette description correspond à la définition de la transformation mentale de Tartre (1990). Dans son étude portant sur une centaine d'étudiants en cours d'introduction au dessin assisté par ordinateur et à la conception assistée par ordinateur, Sorby compare les résultats obtenus par les étudiants au PSVT:R, au MCT et au *Differential Aptitude Tests, Forms S and T* (Bennett, Seashore, & Wesman, 1973) à leur capacité à travailler efficacement dans un environnement de modélisation en 3D, mesurée au travers des évaluations intégrées au cours (Sorby, 1999). L'auteure en conclut que le MCT est le test de mesure le plus fiable, parmi les trois utilisés dans son étude, pour prédire la capacité d'apprentissage et d'utilisation des modelleurs volumiques. Ce résultat est confirmé dans les travaux de Hamlin, Boersma et Sorby (2006) et Steinhauer (2012). Cette dernière explique cette corrélation par le fait que l'utilisation efficace des modelleurs volumiques et la résolution des problèmes présentés dans le MCT nécessitent la capacité à discerner les profils 2D corrects associés à un modèle de solide (Steinhauer, 2012).

Figure 7 – Exemple de question issue du MCT (College Entrance Examination Board, 1939)



Le MRT et le R PSVT:R mesurent la rotation mentale. Le MCT mesure la transformation mentale. Les trois tests papier les plus fréquemment cités (Ault & John, 2010; Kelly Jr, 2013) mesurent des composants de la visualisation spatiale.



## 2.4 Problématique

Il est établi que l'habileté spatiale prédit l'orientation et le succès dans l'étude de l'ingénierie. Cette compétence est liée notamment à la capacité à utiliser les modeleurs volumiques (Hamlin, Sorby, & Boersma, 2006; Steinhauer, 2012), à la créativité (Chang, 2014; Kell, Lubinski, Benbow, & Steiger, 2013), au sexe (Linn & Petersen, 1985) et aux pratiques ludiques (Gold *et al.*, 2018). L'un des composants de l'habileté spatiale, la visualisation spatiale, permet de manipuler mentalement des formes en 2D et en 3D partiellement ou totalement. Cette compétence peut être mesurée grâce à des tests papier. Ce travail s'intéresse à établir si la visualisation spatiale des étudiants, mesurée au travers de tests spatiaux, peut être liée à leur performance académique, telle que mesurée au travers d'évaluations académiques individuelles. Nous faisons l'hypothèse que la rotation mentale et la transformation mentale, telles que mesurées par le MCT, le R PSVT:R et le MRT, peuvent prédire la performance des étudiants dans les évaluations individuelles des disciplines mobilisant les compétences spatiales, telle que l'analyse de mécanismes.

## 3 Méthodologie

### 3.1 Outillage et déroulement

En septembre 2018, 137 étudiants de première année ont passé le MRT et le MCT et 131 étudiants ont passé le R PSVT:R :

- MRT : les sujets ont bénéficié de trois minutes pour la première partie, d'une pause de deux minutes et de trois minutes pour la deuxième partie. Nous avons utilisé la version française d'Albaret et Aubert (1996) indiquant une limite de temps de trois minutes pour chaque partie, approuvée par l'un des auteurs du test (A.R. Kuse, communication personnelle, 25 juin 2018).
- MCT : l'épreuve a duré vingt minutes. Nous avons réalisé notre propre traduction.
- R PSVT:R : les sujets ont bénéficié d'un temps limité d'une heure pour des raisons de logistique et sur l'indication de l'auteure que, selon son expérience, les étudiants complètent les trente questions en trente minutes (S.Y. Yoon, communication personnelle, 16 mai 2018). Nous avons réalisé notre propre traduction, approuvée par l'auteure (S.Y. Yoon, communication personnelle, 18 octobre 2018).

Nous avons choisi de traduire les instructions des tests dont nous ne possédions pas de version française pour ne pas entraver la compréhension des répondants. Nous avons utilisé la version papier des tests. Les réponses étaient à indiquer sur des feuilles de réponses paramétrées dans Auto Multiple Choice (Bienvenue, 2008). Les étudiants ont répondu directement sur la feuille de réponse dans le cas du MCT et du R PSVT:R. Dans celui du MRT, dont la limite de temps est très courte, ils ont répondu sur les énoncés puis, reporté les réponses durant la pause et après avoir terminé la seconde partie de l'épreuve. Dans tous les cas, il a été demandé aux étudiants de ne pas répondre au hasard.

L'ordre de passage des tests, MRT, MCT et R PSVT:R, a été choisi en fonction des créneaux disponibles. Certains groupes ont passé le MRT et le MCT sur le même créneau, puis le R PSVT:R sur un autre créneau le même jour. D'autres groupes ont passé le MRT et le MCT sur le même créneau, puis le R PSVT:R sur un autre créneau un autre jour.

### 3.2 Échantillon et méthode d'analyse des données

Les étudiants intègrent l'école sur concours après avoir suivi une classe préparatoire, une licence 2 ou une licence 3, ou obtenu un brevet de technicien supérieur ou un diplôme universitaire technique. Les

étudiants issus de classes préparatoires proviennent des spécialisations Mathématiques et Physiques, Physique et Chimie, Physique et Sciences de l'Ingénieur, Physique et Technologie, Technologie et Sciences Industrielles et Adaptation Technicien Supérieur. Les étudiants sont âgés de 18 à 23 ans, la moyenne est de 20,35 ans. 137 étudiants,  $N_F = 37$  [27%] femmes et  $N_H = 100$  [73%] hommes, ont passé le MCT et le MRT. 131 étudiants,  $N_F = 36$  [27, 48%] femmes et  $N_H = 95$  [69,34%] hommes, ont passé le R PSVT:R.

Les notes individuelles du premier semestre des matières Mathématiques appliquées (MAPP), Analyse de mécanismes (AMEC) et Algorithmiques et programmation (ALGO) ont été collectées auprès de la Scolarité et des enseignants. L'ensemble des données a été anonymisé.

Le module MAPP aborde la théorie des distributions d'une variable réelle et la transformée de Laplace. Le module AMEC a pour objectif d'apprendre aux étudiants à analyser un mécanisme industriel pour schématiser sa cinématique, à identifier les conditions technologiques de son bon fonctionnement, à vérifier par calcul ses performances et à proposer une méthode de fabrication de certains de ses composants. Le module ALGO a pour but d'encourager les apprenants à acquérir des bases rigoureuses et structurées en algorithmique et en structures de données fondamentales et à connaître les bases du langage C.

La relation entre la performance des étudiants aux tests spatiaux et la performance académique a été explorée au travers d'une analyse de variance de la régression, « qui a pour but de tester s'il y a une relation linéaire entre les variables » (Kinnear & Gray, 2005, p. 323), réalisée dans SPSS. Pour chaque analyse, le score au test spatial a été utilisé comme variable indépendante et le résultat à l'évaluation académique a été utilisée comme variable dépendante.

## 4 Résultats et discussion

Les résultats des étudiants aux tests spatiaux et aux évaluations individuelles des MAPP, AMEC, ALGO et MAPP sont présentés dans les Tableaux 1 et 2 respectivement.

Tableau 1 – Résultats aux tests spatiaux

Test spatial	Score maximal	Moyenne	Écart-type	N
MCT	25	15,14	5,60	137
R PSVT:R	30	24,12	4,25	131
MRT	20	12,24	4,23	137

Tableau 2 - Notes individuelles du premier semestre

Enseignement	Note maximale	Moyenne	Écart-type	N
MAPP	20	11,40	3,68	140
AMEC	20	13,02	2,53	138
ALGO1	20	15,12	3,23	138
ALGO2	20	12,65	4,35	134

Les résultats significatifs de l'analyse de variance sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Analyse de variance

Variable dépendante	Prédicteur	P-value	Coefficient	Constante
AMEC	MCT	0,001 **	0,241	9,394
AMEC	MRT	0,016 *	0,240	10,277
ALGO1	MCT	0,007 **	0,139	13,050
ALGO1	R PSVT:R	0,041 *	0,140	11,847
ALGO1	MRT	0,012 *	0,171	13,060
ALGO2	MCT	0,036 *	0,145	10,420
MAPP	MCT	0,038 *	- 0,116	13,127
MAPP	R PSVT:R	0,049 *	- 0,145	15,024

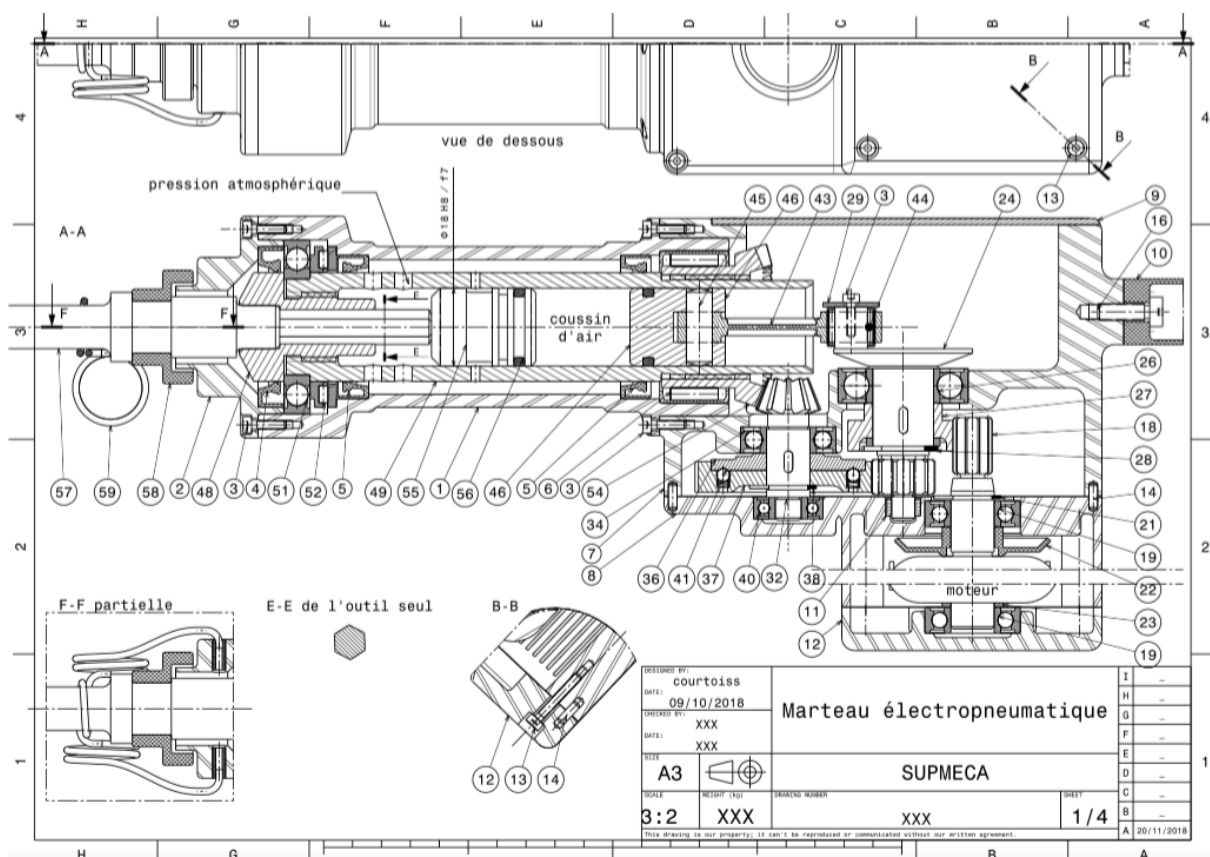
Note : \*\* correspond à  $p \leq 0,01$

\* correspond à  $0,01 < p \leq 0,05$

## 4.1 Résultats AMEC

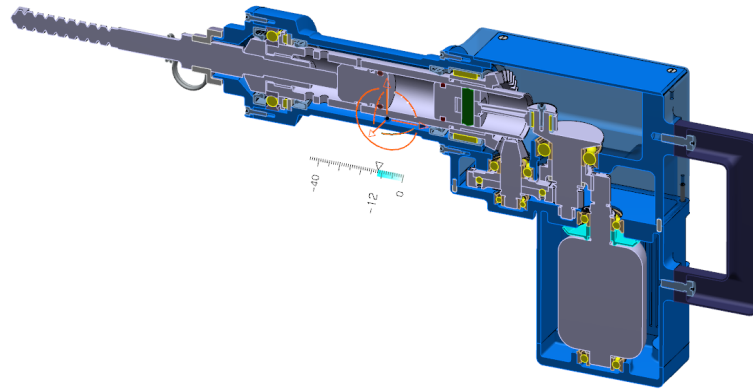
L'évaluation retenue pour le module AMEC comporte des représentations en perspective d'un objet en 3D sous différents angles, des coupes transversales horizontales et verticales de cet objet, ainsi qu'un dessin éclaté. Le passage d'une représentation à une autre de ce même objet nécessite de faire des liens entre un objet représenté en perspective et des coupes transversales de cet objet, comme illustré dans la Figure 8.

Figure 8 – Exemples de vue et de coupes transversales horizontales et verticales issues du sujet d'AMEC (Courtois, 2018)



Les étudiants ont de plus accès à une maquette numérique dans la base CATIA (Dassault Systèmes, 2012) lors du passage de l'épreuve. À partir de cette base, ils peuvent générer différentes représentations du système, comme illustré dans la Figure 9.

Figure 9 – Exemple de représentation en perspective d'une coupe transversale verticale accessible dans CATIA (Dassault Systèmes, 2012) pour le sujet d'AMEC (Courtois, 2018)



L'analyse de variance révèle la forte significativité ( $p = 0,001$ ) de la prédiction de résultat en AMEC à partir du score du MCT et la faible significativité ( $p = 0,016$ ) du score de MRT. Ces résultats nous amènent à proposer les explications suivantes : les étudiants à faibles compétences spatiales n'ont pas pu correctement :

- interpréter et utiliser informations visuelles en 2D et en perspective fournies dans le sujet,
- utiliser le modèleur de manière efficace (Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999; Steinhauer, 2012),
- bénéficier des ressources disponibles dans le modèleur car leurs faibles représentations internes ne leur ont pas permis d'accéder aux représentations externes (Keehner, Hegarty, Cohen, Khooshabeh, & Montello, 2008).

Il est à noter que bien que le MRT et le R PSVT:R visent à mesurer la même compétence, c'est-à-dire la rotation mentale, nous observons ici l'existence d'une corrélation significative entre le score de MRT et la note d'AMEC, et l'absence de corrélation entre le score de R PSVT:R et la note d'AMEC. Bien que ces deux tests visent à mesurer la même compétence, le mode de passation des tests est très différent. Le MRT est très limité dans le temps, la limite de temps décourageant les sujets d'avoir recours à une stratégie analytique de résolution des problèmes (Bodner & Guay, 1997). La rotation mentale est une opération de transformation mentale qui consiste à faire tourner la totalité de l'objet mentalement. Le recours à une stratégie analytique, qui permet de décomposer l'objet en plusieurs éléments et de les comparer un à un à une autre forme (Bodner & Guay, 1997), ne mobilise pas la compétence de rotation mentale. De nombreuses études mettent en exergue le recours à des stratégies analytiques lors du passage du MRT (Albaret & Aubert, 1996; Hegarty, 2018; Lin, 2016). Le R PSVT:R en revanche n'est pas limité dans le temps de manière à ne pas pénaliser la performance des femmes, qui réussissent moins bien lorsqu'elles sont limitées dans le temps (Maeda & Yoon, 2016). À notre connaissance, aucune étude n'a rapporté de recours à des stratégies analytiques pour résoudre les problèmes du R PSVT:R. L'absence de corrélation entre la note d'AMEC et le R PSVT:R pourrait être expliquée par le fait que l'épreuve d'AMEC ne mobilise pas la compétence de rotation mentale.

## 4.2 Résultats ALGO

Le test ALGO1 porte sur la compréhension de code et l'écriture de fonctions simples. Le test ALGO2 porte sur l'algorithmique et le langage C, les deux aspects étant évalués de manière indépendante.

L'analyse de variance révèle une faible significativité du pouvoir de prédiction des scores de R PSVT:R et de MRT pour la performance en ALGO1 et des scores de MCT pour la performance en ALGO2, ainsi qu'une forte significativité du pouvoir de prédiction des scores de MCT pour la performance en ALGO1. Bien que la description des évaluations ALGO1 et ALGO2 ne comporte pas d'éléments relatifs à la visualisation spatiale, la littérature fait état de corrélations entre l'habileté spatiale et l'informatique. L'étude de Shea *et al.* (2001) montre que les individus, issus de leur sélection, qui se sont engagés dans des études de premier cycle universitaire, de troisième cycle universitaire et des professions en informatique avaient fait preuve de capacités spatiales élevées entre l'âge de douze et quatorze ans. Ce résultat est confirmé par l'étude Wai *et al.* (2009) qui porte sur une population d'individus beaucoup plus large et moins sélectionnée que celle de l'étude de Shea *et al.* (2001).

### 4.3 Résultats MAPP

L'évaluation de MAPP porte sur les distributions, les produits de convolution, la transformée de Laplace et la transformée de Fourier.

L'analyse de variance indique une faible significativité du pouvoir de prédiction des scores de MCT et de R PSVT:R pour la performance en MAPP. À nouveau, la description de cette évaluation ne comporte pas d'éléments faisant appel à des éléments visuels, mais la corrélation étant négative, des scores élevés à ces deux tests spatiaux prédisent l'échec à cette évaluation, alors que des scores spatiaux faibles prédisent la réussite à cette évaluation. Selon l'auteur de l'évaluation, la résolution des problèmes présentés dans le sujet de MAPP nécessite une très grande capacité d'abstraction (S. Dugowson, Communication personnelle, 3 avril 2019). Pouvons-nous en conclure que cette capacité fait défaut aux individus dont les capacités de visualisation spatiale sont élevées ? Et qu'inversement, que les individus qui en démontrent la maîtrise soient caractérisés par des capacités spatiales faibles ? Il est à noter à nouveau la disparité entre les résultats de l'analyse de variance avec le MRT et ceux de l'analyse avec le R PSVT:R, dont nous avons suggéré la plus grande fiabilité pour mesurer la rotation mentale.

### 4.4 Limites et perspectives

Les répondants n'ont pas été interrogés sur les stratégies qu'ils avaient adoptées durant le passage des épreuves spatiales. Il est donc difficile d'établir si les compétences de visualisation spatiale ont été mobilisées. De nouvelles études intégrant le recueil et l'encodage de ces données sont nécessaires pour affiner cette variable.

L'épreuve d'AMEC met à disposition des étudiants une maquette numérique donnant accès à des représentations plus riches que les vues isométriques et les représentations en 2D : couleur, ombres qui donnent une impression de profondeur, possibilité de cacher et révéler des pièces, possibilité de choisir le point de vue ou la coupe. Leur activité sur ce logiciel durant l'épreuve n'a pas été observée. Il serait intéressant, dans une étude complémentaire, de l'enregistrer pour vérifier s'ils l'utilisent et comment ils l'utilisent, et de rapprocher ces observations avec leurs compétences spatiales et leur performance à l'épreuve d'AMEC.

## 5 Conclusion

Les capacités de visualisation spatiale d'étudiants, intégrés après deux années d'études post-bac en première année à Supméca, école d'ingénieurs spécialisée en mécanique, ont été mesurées à leur arrivée à l'école au travers du MCT, qui vise à évaluer la compétence de transformation mentale, et du MRT et du R PSVT:R, qui visent à mesurer la rotation mentale. L'exploration d'une relation linéaire entre ces scores et les résultats des étudiants dans les enseignements de mathématiques appliquées, d'analyse de mécanismes, d'algorithmique et de programmation en langage C, et de transferts thermiques a mis en exergue un pouvoir de prédiction à forte significativité de la compétence de transformation mentale dans la capacité à analyser des mécanismes et à comprendre des codes et à écrire de fonctions simples en langage C. Elle a aussi révélé un pouvoir de prédiction à faible

significativité de la compétence de visualisation spatiale dans la capacité à comprendre des codes et à écrire de fonctions simples en langage C, ainsi qu'un pouvoir de prédiction à faible significativité de la compétence de rotation mentale, telle que mesurée par le MRT, dans la capacité à analyser des mécanismes. Finalement, nous avons observé une corrélation négative à faible significativité entre la compétence de visualisation spatiale et la capacité à résoudre des problèmes portant sur les distributions, les produits de convolution, la transformée de Laplace et la transformée de Fourier. L'hypothèse que nous avons formulée sur la relation existant entre la visualisation spatiale et les enseignements et apprentissages mobilisant des représentations spatiales en 2D et en 3D a été vérifiée. Nous avons été surpris de découvrir une relation entre la visualisation spatiale et la capacité à comprendre des codes et à écrire de fonctions simples en langage C, bien que la corrélation entre l'habileté spatiale et l'informatique ait été établie (Shea *et al.*, 2001; Wai *et al.*, 2009). Finalement, une corrélation négative entre la visualisation spatiale et la performance en mathématiques appliquées été observée. Le caractère prédictif de ces tests spatiaux étant vérifié (Sorby, 1999), et la malléabilité des compétences spatiales étant établie (Uttal *et al.*, 2013), des dispositifs de remédiation à mettre en place avant le démarrage des enseignements concernés sont envisageables, pour favoriser l'apprentissage et la performance des étudiants (Sorby, 2005) et leur donner accès à un plus large panel de spécialisations.

## Références

- Albaret, J. M., & Aubert, E. (1996). Etalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg. *EVOLUTIONS psychomotrices*, 8(34), 269-278.
- 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.
- Bennett, G. K., Seashore, H. G., & Wesman, A. G. (1973). *Differential Aptitude Tests, Forms S and T*.
- Bienvenue, A. (2008). Auto Multiple Choice (Version 1.3.0). <https://www.auto-multiple-choice.net/>.
- Bodner, G. M., & Guay, R. B. (1997). The Purdue Visualization of Rotations Test. *The Chemical Educator*, 2(4), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00897970138a>
- 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>
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge University Press.
- Chang, Y. (2014). 3D-CAD effects on creative design performance of different spatial abilities students. *Journal of Computer Assisted Learning*, 30(5), 395-407.
- College Entrance Examination Board. (1939). *Special Aptitude Test in Spatial Relations (Mental Cutting Test)*. College Entrance Examination Board.
- Connor, J. M., & Serbin, L. A. (1980). *Mathematics, Visual-Spatial Ability, and Sex Roles. Final Report*. Consulté à l'adresse <https://eric.ed.gov/?id=ED205385>
- Dassault Systèmes. (2012). CATIA (Version V6 2013x). Dassault Systèmes.
- Duroisin, N. (2015). *What place for spatial learning in school? Experimental study of the development of spatial skills by learners aged 6 to 15 years* (Theses, Université de Mons). Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01152392>
- Educational Testing Service. (1948). *College Board Scholastic Aptitude Test*. Princeton, NJ.
- Eliot, J., & Smith, I. M. (1983). *An international directory of spatial tests*. Cengage Learning Emea.
- Flanagan, J. C., Dailey, J. T., Shaycoft, M. F., Gorham, W. A., Orr, D. B., Goldberg, I., & Neyman JR, C. A. (1961). *Project TALENT*. Project Talent Office.

- French, J. W. (1951). *The description of aptitude and achievement tests in terms of rotated factors*. Chicago, IL, US: University of Chicago Press.
- Gold, A. U., Pendergast, P. M., Ormand, C. J., Budd, D. A., Stempien, J. A., Mueller, K. J., & Kravitz, K. A. (2018). Spatial skills in undergraduate students—Influence of gender, motivation, academic training, and childhood play. *Geosphere*, 14(2), 1-16. <https://doi.org/10.1130/GES01494.1>
- Guay, R. (1977). *Purdue Spatial Visualization Test: Rotations*. Purdue Research Foundation: West Lafayette, IN.
- Guay, R. B. (1980). *Spatial Ability Measurement: A Critique and an Alternative*. Paper présenté à Annual Meeting of the American Educational Research Association, Boston, MA.
- Hamlin, A., Sorby, S., & Boersma, N. (2006). Do Spatial Abilities Impact the Learning of 3-D Solid Modeling Software? *Proceedings of the 2006 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*. Présenté à American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, Chicago, IL, États-Unis d'Amérique.
- 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.
- Hoyek, N., Collet, C., & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur : le cas de la rotation mentale. *Science & Motricité*, (71), 29-39. <https://doi.org/10.1051/sm/2009013>
- Keehner, M., Hegarty, M., Cohen, C. A., Khooshabeh, P., & Montello, D. R. (2008). Spatial Reasoning With External Visualizations: What Matters Is What You See, Not Whether You Interact. *Cognitive Science*, 32, 1099–1132. <https://doi.org/10.1080/03640210801898177>
- Kell, H. J., Lubinski, D., Benbow, C. P., & Steiger, J. H. (2013). Creativity and Technical Innovation: Spatial Ability's Unique Role. *Psychological science*, 24(9), 1831-1836. <https://doi.org/10.1177/0956797613478615>
- Kelly Jr, W. F. (2013). *Measurement of Spatial Ability in an Introductory Graphic Communications Course - ProQuest*. North Carolina University, Raleigh.
- Kersh, M. E., & Cook, K. H. (1979). Improving mathematics ability and attitude, a manual. *Seattle: Mathematics Learning Institute, University of Washington*.
- Kinnear, P., & Gray, C. (2015). *SPSS facile appliqué à la psychologie et aux sciences sociales: Maîtriser le traitement des données*. De Boeck.
- Lin, H. (2016). Influence of design training and spatial solution strategies on spatial ability performance. *International Journal of Technology and Design Education*, 26(1), 123-131. <https://doi.org/10.1007/s10798-015-9302-7>
- 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. <https://doi.org/10.2307/1130467>
- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. In *Advances in the psychology of human intelligence, Vol. 4*. (p. 181-248). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Lohman, D. F. (1993, juillet). *Spatial Ability and G*. Paper présenté à Spearman Seminar, University of Plymouth. Consulté à l'adresse <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.7385&rep=rep1&type=pdf>
- Maeda, Y., & Yoon, S. Y. (2016). Are Gender Differences in Spatial Ability Real or an Artifact? Evaluation of Measurement Invariance on the Revised PSVT:R. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 34(4), 397-403. <https://doi.org/10.1177/0734282915609843>

- 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*, 63–75.
- 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>
- Michael, W. B., Guilford, J. P., Fruchter, B., & Zimmerman, W. S. (1957). The Description of Spatial-Visualization Abilities. *Educational and Psychological Measurement*, 17(2), 185-199. <https://doi.org/10.1177/001316445701700202>
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A Redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test - Different Versions and Factors That Affect Performance. *Brain and Cognition*, 28(1), 39-58. <https://doi.org/10.1006/brcg.1995.1032>
- Petitjean, S., Tummarello, S., Jamart, J. F., Adam, F., Clerc, F., & Bourbion, M. (2012). *La troisième dimension. Voir et concevoir l'espace*. Consulté à l'adresse [http://www-irem.univ-paris13.fr/site\\_spip/spip.php?article347](http://www-irem.univ-paris13.fr/site_spip/spip.php?article347)
- Shea, D. L., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2001). Importance of assessing spatial ability in intellectually talented young adolescents: A 20-year Longitudinal Study. *Journal of Educational Psychology*, 93(3), 604-614. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.3.604>
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972), 701-703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Sorby, S. A. (1999). Spatial Abilities and their Relationship to Computer Aided Design Instruction. *Proceedings of the 1999 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*. Présenté à 1999 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, Charlotte, North Carolina, États-Unis d'Amérique.
- Sorby, S. A. (2005). Impact of changes in course methodologies on improving spatial skills. *Journal of Geometry and Graphics*, 99–105.
- Sorby, S., Casey, B., Veurink, N., & Dulaney, A. (2013). The role of spatial training in improving spatial and calculus performance in engineering students. *Learning and Individual Differences*, 26(Supplement C), 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.03.010>
- Steinhauer, H. M. (2012a). 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.
- Steinhauer, H. M. (2012b). 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.
- Stieff, M., & Uttal, D. (2015). How Much Can Spatial Training Improve STEM Achievement? *Educational Psychology Review*, 27(4), 607-615. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9304-8>
- Tartre, L. A. (1990). Spatial skills, gender, and mathematics. *Mathematics and gender*, 27–59.
- Thurstone, L. L. (1950). Some Primary Abilities in Visual Thinking. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 94(6), 517-521.
- 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>
- Yoon, S. Y. (2011). *Psychometric properties of the Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations (the Revised PSVT:R)* (Doctoral Dissertation). Retrieved from ProQuest Dissertations and Theses. (Order Number: 3480934).
- Yue, J. (2006). Spatial Visualization by Isometric Drawing. *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference*, 24. Union, New Jersey, États-Unis d'Amérique.
- Yue, J. (2008). Spatial Visualization by Realistic 3D Views. *Engineering Design Graphics Journal*, 72(1), 28-38.