



HAL
open science

Habilités spatiales et instruments de mesure

Sophie Charles

► **To cite this version:**

Sophie Charles. Habiletés spatiales et instruments de mesure. Carnets de laboratoire - Revue de littérature, 2, Éditions de Bonne Heure; Zenodo, pp.59-75, 2023, 978-2-493781-15-4. 10.5281/zenodo.10372142 . hal-04444263

HAL Id: hal-04444263

<https://hal.science/hal-04444263>

Submitted on 7 Feb 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Habilités spatiales et instruments de mesure

DOI : 10.5281/zenodo.10372142

Charles Sophie

Laboratoire BONHEURS (Bien-être, Organisations, Numérique, Habitabilité, Éducation, Universalité, Relation, Savoirs), EA7517 CY Cergy Paris Université

sophie.charles@cyu.fr

ORCID : 0000-0002-4499-5842

Résumé : Cet article a pour but de présenter la méthodologie que nous avons adoptée pour identifier dans la littérature de la recherche portant sur l'habileté spatiale, les différents facteurs qui la composent et les multiples outils qui visent à les mesurer. Pour ce faire, nous nous sommes attachée dans un premier temps à retracer les évolutions itératives sur la base des recherches qui se sont développées depuis le début du 20^e siècle. Nous décrivons ensuite comment nous avons exploré la littérature contemporaine pour nous procurer des tests spatiaux désormais difficiles d'accès.

Abstract : The purpose of this article is to present the method we have adopted to identify spatial factors in the research dedicated to the definition of spatial ability, as well as the multiple psychometric tests designed to measure them. This involved recounting the iterative findings which have been reported since the beginning of the 20th century, and exploring more contemporary research to source difficult-to-access spatial tests.

Ce travail de recherche a été réalisé sous la responsabilité d'Alain JAILLET, d'Alain RIVIÈRE, de Laurent JEANNIN et de Nicolas PEYRET

Mots clés : habileté spatiale, tests spatiaux

1. INTRODUCTION

Le projet e-FRAN Expérimenter l'Apprentissage par Problèmes et par Projets via la conception 3D (EXAPP_3D)², porté par l'école d'ingénieurs ISAE-Supméca, s'intéresse à la formation des collégiens à la technologie. Plus précisément, il vise à « entretenir et accentuer l'intérêt des élèves du secondaire dans les filières techniques et professionnelles dédiées principalement à la conception et la définition de produits industriels en vue d'améliorer leur réussite scolaire » (ISAE-Supméca, 2016, paragr. 1). À cette fin, ce projet s'appuie sur une approche par problèmes et par projets et met en œuvre des outils de modélisation volumique auprès d'élèves de collège, de lycées et d'écoles d'ingénieurs dans des travaux de groupe. L'utilisation à des fins pédagogiques des modélisateurs volumiques, outils issus du monde professionnel, soulève cependant plusieurs questions : la modélisation 3D requière-t-elle des compétences particulières ? Si oui, lesquelles ? Peut-on caractériser ces compétences ? Autant de questions à aborder afin de comprendre ce qui est mis en œuvre dans l'activité de modélisation

² Cette opération est soutenue par l'État dans le cadre du volet e-FRAN du programme d'Investissements d'avenir, opéré par la Caisses de Dépôts.

volumique, aujourd'hui enseignée au collège et dans certaines formations spécialisées de l'enseignement supérieur.

En effet, l'avènement de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) dans le monde industriel dans les années 1980 a profondément impacté le monde de la conception mécanique et de la formation des professionnels de cette activité : les cours de dessin industriel et de géométrie descriptive ont disparu des enseignements, au profit des cours de modélisation volumique (Ault et John, 2010, p. 13; Hamon, 2009, p. 40; Poitou, 1984, p. 478). Cependant, la modélisation 3D requière la compréhension et la manipulation d'objets géométriques en deux et en trois dimensions (Bertoline *et al.*, 2009, p. 642; Rynne et Gaughran, 2007, p. 55). La maîtrise de ces compétences, mesurées à l'aide de tests psychométriques, prédit la capacité à modéliser en trois dimensions (Agbanglanon, 2019; Branoff et Dobelis, 2012; Steinhauer, 2012).

2. CONTEXTE MÉTHODOLOGIQUE

Notre travail de recherche s'inscrit dans le contexte d'un projet e-Fran liant l'école d'ingénieurs ISAE-Supméca et le laboratoire de recherche en éducation BONHEURS. Il a mené au recrutement d'une doctorante au moyen d'une fiche de poste, décrivant un contexte scientifique situé dans un corpus d'études investiguant les habiletés spatiales, leurs outils de mesure et leurs relations avec la performance en CAO. Cette bibliographie centrée sur la relation entre habiletés spatiales et CAO fournit notre première approche de la revue de littérature que nous développons au fil de l'eau, en repérant les publications mentionnées de manière récurrente. Celles-ci s'inscrivent dans un contexte plus large de recherches portant sur le lien entre habiletés spatiales et performance en Sciences, Technologie, Ingénierie et Mathématiques (STIM).

Depuis les années 1930, des chercheurs en psychologie et des enseignants de STIM font le lien entre habileté spatiale et ces disciplines, que cela concerne les études dans ces spécialités, e.g. médecine, dentisterie, ingénierie, ou des activités professionnelles spécifiques, e.g. le stylisme, le dessin industriel, la conception de moules (Bingham, 1937, p. 171; Macfarlane Smith, 1964, p. 154; Sorby *et al.*, 2013, p. 20). Wai *et al.* établissent finalement cette relation en 2009, en s'appuyant sur 346 665 sujets du *Project Talent* (Flanagan *et al.*, 1961) pour montrer que la probabilité d'obtenir une qualification élevée en STIM est fonction de l'habileté spatiale mesurée à l'adolescence (Wai *et al.*, 2009, p. 825).

Les études portant sur le caractère prédictif des tests de performance spatiale de la performance en modélisation (Branoff et Dobelis, 2012; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012) mentionnent l'utilisation de tests spatiaux, dont la compétence décrite comme visée diffère selon les auteurs. Ainsi Branoff et Dobelis indiquent que le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations* (Guay, 1976a) est un test de visualisation spatiale (p. 39), alors que Sorby le décrit comme un test d'habileté spatiale (p. 4.465.3).

Cette absence de consensus autour d'une définition claire de l'habileté spatiale et des outils de mesure qui s'y rapportent est source de confusion (Eliot et Macfarlane Smith, 1983, sect. Préface; Uttal *et al.*, 2013, p. 353). En 1983, Eliot et Macfarlane Smith (1983) regroupent les 392 tests spatiaux qu'ils ont collectionnés en un catalogue et sont confrontés à la difficulté à organiser cette collection. Les auteurs décident d'opter pour un classement selon la similarité perçue des stimuli et des tâches présentées dans les tests. Selon les auteurs, ces derniers ont

évolué avec l'histoire de la recherche portant sur la définition de l'habileté spatiale, qui a changé d'objectif au court des années.

Pour établir l'objet de littérature sur cette question, la méthode consiste à retrouver les évolutions itératives sur la base des recherches qui se sont développées. La récurrence de références à la description d'Eliot (1983) du contexte historique de la recherche sur les habiletés spatiales nous incite à reprendre ce texte, et à en vérifier les références présentées en ressources originales chaque fois possible, de manière à éviter les références secondaires. Nous la complétons ensuite à l'aide des travaux de Lohman (Lohman, 1979, 1993; Lohman *et al.*, 1987), qui s'est aussi penché sur les éléments historiques de ce domaine de recherche pour en décrire le contexte, pour la période décrite par Eliot. Finalement, nous prolongeons cette chronologie, en identifiant les thèmes récurrents dans les recherches contemporaines portant sur les liens entre habiletés spatiales et STIM.

3. HISTORIQUE DE LA RECHERCHE SUR L'HABILETÉ SPATIALE

Cette revue de littérature, issue de notre travail de thèse (Charles, 2023), présente l'historique de la recherche portant sur l'habileté spatiale, en nous intéressant plus particulièrement aux études qui investiguent le lien entre performance spatiale et STIM. Eliot (1983, 1987) identifie trois phases dans l'histoire de la recherche portant sur l'habileté spatiale :

- une première de 1904 à 1938, caractérisée par la recherche d'un facteur spatial qui s'ajouterait au facteur général de l'intelligence ;
- une seconde phase de 1938 à 1961, marquée par la recherche de différences entre plusieurs facteurs spatiaux ;
- une troisième phase de 1961 à 1982, définie par l'étude des sources de variance qui impactent la performance dans les tests spatiaux et la relation existant entre l'habileté spatiale et les autres habiletés (Eliot, 1983, p. 1).

Cet article présente une synthèse à partir de la description des trois phases identifiées par Eliot, complétée par notre recension de travaux de recherches, et de notre description d'une quatrième phase portant sur le lien entre habiletés spatiales et STIM à partir des années 1980.

20. Phase I – 1904-1938

La première phase de la recherche sur l'habileté spatiale débute avec la théorie factorielle de Spearman en 1904 (p. 1) : chaque test d'intelligence³ peut être analysé selon un facteur unique commun à tous les tests, le facteur général G, et d'un facteur S spécifique au test utilisé, (Burt, 1949a, p. 102; Eliot, 1983, p. 1, 1987, p. 40; Spearman, 1904, p. 273). Cette théorie ouvre la voie à l'école britannique de la classification hiérarchique des habiletés (Lohman *et al.*, 1987, p. 258). La théorie de Spearman permet à Kohs (1923 cité dans Eliot, 1983, p. 2) et Alexander (1935 cité dans Eliot, 1983, p. 2) d'identifier une habileté mécanique ou pratique.

Alors que les tests d'intelligence de l'époque visent généralement les compétences verbales, Binet et Simon publient leur Échelle métrique d'intelligence en 1905 : celle-ci inclut des questions de raisonnement sur des formes et constitue l'un des premiers tests de l'habileté spatiale (Binet et Simon, 1907; Lohman, 1993, p. 5). Le déploiement des tests de

³ Selon Cronbach (1949), « un test peut être défini comme une procédure systématique pour comparer le comportement de deux ou plus personnes [*a test maybe defined as a systematic procedure for comparing the behavior of two or more persons*] » (p. 11).

performance⁴ *Examination Beta* de *The United States Army*, destinés à évaluer les candidats peu éduqués ou aux compétences langagières faibles, permet l'accroissement des tests non-verbaux (Eliot, 1983, p. 2, 1987, p. 42; Lohman, 1979, p. 8).

À la différence de Spearman qui revendique un facteur commun de l'intelligence et des facteurs spécifiques, l'Américain Thurstone part du principe que la performance à un test dépend de plusieurs capacités mentales primaires (Eliot, 1983, p. 3; Lohman, 1979, p. 2). Grâce à sa méthodologie multifactorielle présentée en 1931, il démontre l'existence du facteur *space S* en 1938, qui « semble être impliqué dans n'importe quelle tâche dans laquelle le sujet manipule un objet mentalement en deux ou trois dimensions [*seems to be involved in any task in which the subject manipulates an object imaginally in two or in three dimensions*] » (Thurstone et Thurstone, 1941, p. 4). Au même moment, au Royaume Uni, El Koussy (1935 cité dans Eliot, 1983, p. 3) administre une batterie de tests à des garçons âgés de 11 à 13 ans et identifie le facteur *K*, qu'il définit comme « la capacité à produire et la facilité à utiliser une imagerie visuelle spatiale [*the ability to obtain and the facility to utilize spatial visual imagery*] ». Cette description implique la nécessité de manipuler mentalement des relations spatiales (Eliot, 1983, p. 3; Lohman, 1979, p. 136). Les travaux d'El Koussy et de Thurstone, qui révèlent l'existence d'un facteur spatial en produisant de nombreux tests visant à le mesurer, concluent cette première période (Eliot, 1983, p. 3).

3.1 Phase II – 1938-1961

La seconde période décrite par Eliot (1983, section Phase II) est caractérisée par la recherche de sous-facteurs composant l'habileté spatiale, et la multiplication des tests papier-crayon, c'est-à-dire des tests auxquels les sujets répondent en écrivant ou dessinant leur réponse (Cronbach, 1949, p. 16). Ces tests sont plus faciles à utiliser que les tests de performance qui nécessitent du matériel physique (Lohman *et al.*, 1987, p. 262). L'approche de la seconde guerre mondiale amène un besoin urgent de recruter un grand nombre de personnel militaire, dont des candidats aptes à voler ou à entretenir des avions. De nombreux tests sont développés à cette occasion et leurs résultats sont étudiés. En 1949, Thurstone et Thurstone (cités dans Eliot, 1983, p. 4; Zimmerman, 1954, p. 396) identifient les facteurs *S1*, qui représente l'habileté à visualiser des configurations rigides quand elles sont déplacées, et *S2*, qui consiste en la capacité à visualiser une configuration dans laquelle des parties de la configuration ont été déplacées ou bougées. French (1951) reprend plusieurs travaux, dont ceux de *The United States Army Air Force (AAF)* (s.d.) et de Thurstone, et établit l'existence de trois facteurs spatiaux : le facteur spatial (p. 234), la visualisation (p. 247) et l'orientation spatiale (p. 240).

Au Royaume Uni, la seconde guerre mondiale est suivie de la mise en application de l'*Education Act* en 1944 qui implique de distinguer les élèves pour les collèges d'enseignement général, des élèves pour les collèges techniques. Cette réforme mène au développement de nouveaux tests et attire l'attention sur le rôle joué par les caractéristiques individuelles des sujets dans leur performance aux tests (Burt, 1949b, p. 187; Eliot, 1983, p. 5). En 1949, Burt met en évidence l'existence d'un facteur *practical*⁵, qu'il subdivise en un sous-facteur spatial

⁴ « Dans un test de performance il est demandé au sujet de faire la démonstration de sa compétence en manipulant des objets ou un instrument [*In a performance test the subject is required to demonstrate his skill by manipulating objects or apparatus*] » .

⁵ *Practical* = (personne) doué de ses mains, habile de ses mains, bricoleur, bricoleuse (Kellogg, s.d.)

et un sous-facteur mécanique. Le facteur spatial est composé d' « au moins deux facteurs de ce type, à savoir un facteur pour les relations spatiales statiques et un facteur pour les relations spatiales cinétiques [*at least two factors of this kind, namely, a factor for **static** spatial relations and a factor for **kinetic** spatial relations*] » (Burt, 1949b, p. 188).

Aux États Unis d'Amérique (EUA), Zimmerman (cité dans Eliot, 1983, p. 5, cité dans Eliot, 1987, p. 52) augmente la difficulté de plusieurs questions du test *Visualization of Manoeuvres* lors de l'évaluation d'élèves pilotes. L'analyse des résultats lui fait conclure à l'existence d'un continuum classant les facteurs vitesse de perception, espace et visualisation selon un ordre de complexité croissante. Selon lui, les tâches d'orientation spatiale sont plus faciles à réaliser que les tâches de visualisation spatiale.

Devant la prolifération des facteurs et des définitions parfois contradictoires qui s'y rapportent, Michael *et al.* (1957) reprennent les résultats de Thurstone (s.d.), de l'AAF (s.d.) et de French (1954) dans le but de proposer une définition de l'habileté spatiale et une liste de tests spatiaux fiables. Ils concluent à l'existence de trois facteurs spatiaux : un facteur regroupant les relations spatiales et l'orientation spatiale, le facteur visualisation et le facteur imagerie kinesthésique. Ils recommandent d'autre part un ensemble de tests publié par French en 1954 (cité dans Michael *et al.*, 1957, p. 185).

3.2 Phase III – 1961-1982

Selon Eliot (1987), la multiplication des facteurs spatiaux, aux définitions vagues ou contradictoires, de la phase II décourage de nombreux chercheurs, qui se détournent de l'étude de l'habileté spatiale (p. 55). Ceci explique que la troisième période soit marquée par une diminution des études cherchant à définir les facteurs spatiaux, et l'apparition d'études visant à établir une interrelation entre habileté spatiale et autres habiletés d'une part, et d'études cherchant à identifier les sources de variance de la performance dans les tests spatiaux d'autre part.

Ainsi, en 1961, Werdelin (cité dans Eliot, 1983, p. 6; cité dans Eliot, 1987, p. 56) démontre dans son étude sur des lycéens suédois l'existence de deux facteurs, qu'il associe aux facteurs S1 et S2 de Thurstone, et une différence de performance entre les filles et les garçons qui deviendra d'attention de plusieurs études. Il mentionne aussi les procédés de résolution qu'il présume être mis en œuvre par les sujets (cité dans Eliot, 1987, p. 56). McGee (1979) voit de plus dans ces travaux la confirmation que l'habileté spatiale et la performance en mathématiques sont liées (p. 897).

Piaget et Inhelder (1977) introduisent une nouvelle source de variance en liant le développement des capacités spatiales à l'âge : l'enfant construit progressivement sa connaissance de l'espace dès sa naissance. Il évolue d'un espace perceptif, dans lequel la perception sensori-motrice égocentrique de son environnement guide l'acquisition de connaissances de l'espace, vers un espace représentatif, dans lequel il considère les rapports

topologiques⁶ entre les objets. Viennent ensuite l'espace projectif⁷, dans lequel il acquiert la capacité à percevoir les objets et leurs relations d'un point de vue différent du sien, et l'espace euclidien⁸, dans lequel il sait se placer ou placer un objet dans un espace défini par des coordonnées.

L'exploration des traitements engagés dans la résolution des problèmes présentés dans les tests spatiaux permet d'étudier une autre source de variance (Eliot, 1983, p. 6). Les années 1970 connaissent une série d'études établissant des temps de réponse similaires en situations perceptives et en situations imaginatives (p. 28). Ceci conduit les auteurs à conclure à une analogie des processus en situations perceptives et en situations imaginatives et, par conséquence, à une « équivalence des mécanismes régulant l'imagerie et la perception visuelle » (Pilardeau, 2008, p. 28).

3.3 Phase IV - 1982-présent

Nous proposons une quatrième phase de la recherche sur l'habileté spatiale, marquée par l'approfondissement de l'étude de la relation existant entre l'habileté spatiale et les disciplines STIM. Celle-ci trouve ses origines dans la création des tests destinés à l'identification de compétences particulières par l'armée aux EUA et à la sélection des élèves en Grande-Bretagne. Au lieu de porter sur la construction d'outils de sélection, elle porte désormais sur sa dimension prédictive des choix d'orientation, de la réussite et de la persistance dans les études en STIM, dont les sciences de l'ingénieur.

Les études de Shea *et al.* (2001) et Wai *et al.* (2009) établissent la capacité des tests spatiaux à prédire la réussite académique et professionnelle des étudiants engagés dans des études en STIM. Des chercheurs se penchent sur la relation entre habileté spatiale et des activités scientifiques spécifiques, comme celles mettant en œuvre la CAO (Agbanglanon, 2019; Branoff et Dobelis, 2012; Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012). Ces résultats encouragent plusieurs enseignants de disciplines STIM (Contero *et al.*, 2005; Lin, 2016; Martín-Dorta *et al.*, 2008; Martín-Gutiérrez *et al.*, 2013; Mohler et Miller, 2008; Onyancha *et al.*, 2009; Study, 2011) à améliorer la performance et la persistance de leurs étudiants dans les cursus STIM, en leur proposant des dispositifs pédagogiques de remédiation et en mesurant l'efficacité de ces dispositifs. Certains d'entre eux utilisent des outils de CAO pour développer, avec succès, les compétences spatiales (Górska, 2005; Martín-Dorta *et al.*, 2008; Onyancha *et al.*, 2009; Sorby, 1999a). Certaines recherches (Górska, 2005; Leopold *et al.*, 2001; Sorby,

⁶ « Un espace est dit topologique dans la mesure où ses propriétés, dont celle de voisinage, sont conservées lorsqu'on fait subir des déformations continues, sans cassure, à cet espace (un exemple classique et élémentaire est celui d'une surface élastique que l'on étire sans la déchirer, ou la chaussette que l'on retourne de telle sorte que sa surface apparemment extérieure devienne, toujours apparemment, "intérieure") » (Fondation Jean Piaget, 2022c).

⁷ « La géométrie projective concerne les propriétés des objets géométriques qui se conservent lors des transformations par projection. Ces propriétés sont, par exemple, l'alignement des points sur une droite, ou, pour quatre points se trouvant alignés sur une droite, le "birapport" entre le rapport des longueurs des segments orientés séparant deux de ces points du troisième, et le rapport des longueurs des segments orientés séparant les deux mêmes points du quatrième (soit "AB/BC divisé par AD/BD", AB, BC, AD et BD étant les quatre segments orientés) » (Fondation Jean Piaget, 2022b).

⁸ Il s'agit de tout objet dont les propriétés mathématiques obéissent aux axiomes de la géométrie euclidienne, et en particulier à l'axiome ou au postulat d'Euclide ("par un point extérieur à une droite on ne peut mener qu'une seule parallèle à cette droite"). Les autres axiomes fondent le caractère métrique de cet espace, c'est-à-dire la possibilité pour ses contenus d'être mesurés » (Fondation Jean Piaget, 2022a).

2005; Veurink *et al.*, 2009) s'intéressent plus particulièrement à l'efficacité de ces dispositifs sur la progression des femmes, dont la performance est traditionnellement décrite comme inférieure à celle des hommes (Albaret et Aubert, 1996; Bodner et Guay, 1997; Maeda et Yoon, 2013; McGee, 1979). Les résultats obtenus dans ces études permettent à Uttal *et al.* (2013) de faire la démonstration de la malléabilité de l'habileté spatiale dans leur méta-revue.

Parmi ces recherches, certaines poursuivent l'exploration des sources de variance entamée dans la phase III, tel l'effet de l'apprentissage informel. Elles permettent d'établir un lien entre performance aux tests spatiaux et pratique de jeux vidéo d'action (Feng *et al.*, 2007 ; Gold *et al.*, 2018), de jeux de construction (Gold *et al.*, 2018; Górska *et al.*, 1998), de puzzles (Reilly *et al.*, 2017) et de sport (Moreau *et al.*, 2012). D'autres s'intéressent à la relation entre habileté spatiale et prévalence manuelle : une étude antérieure de Guay et McDaniel (1978) avait déjà montré que les droitiers performant significativement mieux que les gauchers au *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* (Guay, 1976b) et au *Mental Rotations Test* (MRT) (Vandenberg et Kuse, 1978) (p. 96). La méta-analyse de Somers *et al.* (2015), s'appuyant sur seize études, établit une supériorité faible mais significative des droitiers dans les tests spatiaux, et plus particulièrement pour le MRT (p. 41). Il est cependant à noter que dans les deux études, la prévalence manuelle n'est considérée qu'en termes de distinction des gauchers des droitiers.

Nous observons finalement la création de nouveaux tests visant à mesurer les compétences spatiales de manière plus fiable (Cohen et Hegarty, 2007; de-Wit *et al.*, 2017; Kozhevnikov et Hegarty, 2001; Yoon, 2011) et l'informatisation de tests papier-crayon (Branoff et Dobelis, 2012; Kelly Jr, 2013; Onyanha *et al.*, 2009; Tsutsumi *et al.*, 1999).

4. L'HABILETÉ SPATIALE ET LES STIM

L'étude de Wai et ses collègues (2009), qui établit la relation entre habiletés spatiales et STIM, soulève deux points qui méritent attention. Le premier concerne la pertinence des tests spatiaux pour sélectionner les étudiants dans les filières sélectives liées aux STIM, comme par exemple dans les programmes éducatifs américains destinés aux élèves identifiés comme doués, ou dans les écoles spécialisées françaises (e.g., Instituts Universitaires de Technologie, Sections de Techniciens Supérieurs, écoles d'ingénieurs). Les évaluations actuelles, qui sollicitent les compétences verbales et mathématiques, et non pas les compétences spatiales, ne permettent pas de dessiner un profil suffisamment heuristique des compétences pertinentes pour l'étude des STIM et l'exercice des professions liées à ces disciplines (Shea *et al.*, 2001, p. 612; Wai *et al.*, 2009, p. 827).

Le second point, qui est directement lié au premier, concerne les conséquences de cette restriction. Dans une société de plus en plus orientée vers la technologie, le mode de sélection actuel présente le risque de passer à côté de profils utiles pour ces études et ces professions, tels les étudiants à la performance spatiale élevée qui ne performant pas suffisamment bien aux épreuves verbales et mathématiques (Shea *et al.*, 2001, p. 612; Wai *et al.*, 2009, p. 817). Ce réservoir de talents reste inexploité par des spécialisations s'appuyant fortement sur les habiletés spatiales, comme les sciences de l'ingénieur et l'architecture.

Cet aspect est d'autant plus important que la performance spatiale semble être plus déterminante pour les études en STIM en début de parcours (Uttal *et al.*, 2013, p. 369; Uttal et Cohen, 2012, p. 168). À la différence des novices, les experts peuvent s'appuyer sur leurs compétences spatiales, mais aussi, et parfois surtout, sur leurs connaissances sémantiques, connaissances que les étudiants de première année ne maîtrisent pas encore (Uttal et Cohen, 2012, p. 164). Celles-ci leur permettent de résoudre des problèmes sans avoir recours aux habiletés spatiales, comme dans le cas des chimistes qui s'appuient sur leurs connaissances des molécules pour distinguer des molécules d'apparence similaire, plutôt que sur une stratégie de rotation mentale.

5. SYNTHÈSE HISTORIQUE

La recherche sur l'habileté spatiale est profondément liée à la recherche en psychologie. Les approches psychométrique, développementaliste et expérimentale ont été utilisées pour tenter de la définir (Eliot, 1987, p. 13). Nous proposons de retenir que la recherche sur l'habileté spatiale a été d'abord motivée par la volonté de définir l'intelligence, puis par des besoins économiques et historiques de classer des individus selon des compétences particulières à des fins de recrutement et d'orientation. Plus tard, les études se sont penchées sur les caractéristiques individuelles des sujets, de manière à identifier les sources de variance en performance spatiale. Parmi celles-ci, l'étude des profils académiques et professionnels permet d'établir un lien entre performance à des tests visant à mesurer les habiletés spatiales et l'orientation en STIM. Ce résultat stimule l'intérêt d'enseignants de ces disciplines pour ces outils de mesure dont ils s'emparent pour identifier des apprenants en difficulté, auxquels ils préconisent des interventions pédagogiques de remédiation, et évaluer l'efficacité de ces dispositifs.

La figure 1 décrit les trois phases d'Eliot (1983), que nous complétons avec la description des tendances des quarante dernières années .

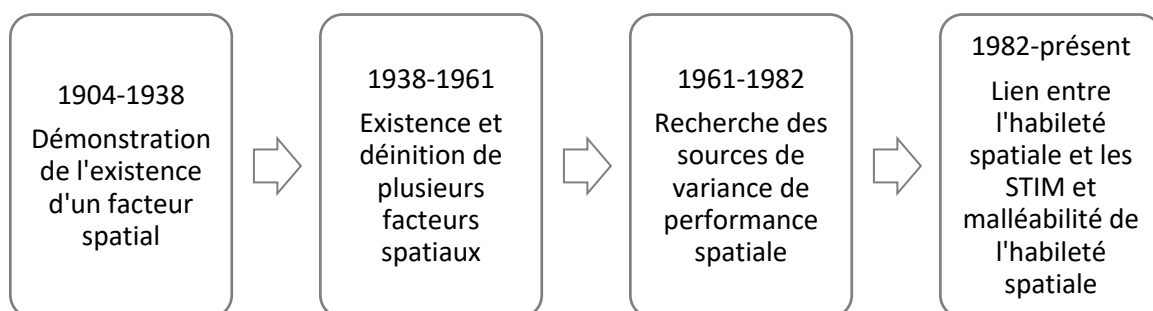


Figure 1 : Phases de l'histoire de la recherche sur l'habileté spatiale

Note. Représentation des phases de l'histoire de la recherche sur les habiletés spatiales. Adapté de « *Habilité spatiale et stratégies de modélisation 3D* » [thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université, Cergy, France] de S. Charles, 2023, p. 38.

6. DÉFINIR ET MESURER L'HABILETÉ SPATIALE

En raison des différentes approches scientifiques qui ont mené à la découverte des facteurs spatiaux, il n'existe pas de consensus sur une définition de l'habileté spatiale (Liao, 2017, p.

134; Martín-Dorta *et al.*, 2008, p. 506; Martín-Gutiérrez *et al.*, 2013, p. 9; McDaniel et Guay, 1976, p. 4; Uttal *et al.*, 2013, p. 353). L'émergence des facteurs est intrinsèquement liée à la prolifération des tests, dont la multitude rend difficile la tâche des chercheurs qui souhaitent évaluer la performance spatiale : il s'agit d'une part d'identifier le ou les facteurs pertinents pour son étude, et d'autre part de se procurer les outils de mesure qui permettent d'évaluer la performance visée. Nous orientons alors notre revue de littérature sur des études portant sur la relation entre STIM et habiletés spatiales proposant des définitions de l'habileté spatiale et/ou des facteurs qui la composent, et/ou décrivant une méthodologie mobilisant des tests qui visent à mesurer ces habiletés. Cette approche nous permet de relever différents facteurs et tests spatiaux, leurs définitions et leur récurrence dans la littérature.

Les facteurs spatiaux composant l'habileté spatiale les plus fréquemment cités sont la visualisation spatiale (Carroll, 1993; Connor et Serbin, 1980; Duroisin, 2015; French, 1951; Linn et Petersen, 1985; Lohman, 1988; Maier, 1996; McGee, 1979; Michael *et al.*, 1957; Tartre, 1990; Thurstone, 1950) et l'orientation spatiale (Connor et Serbin, 1980; Duroisin, 2015; French, 1951; Lohman, 1988; Maier, 1996; McGee, 1979; Tartre, 1990; Thurstone, 1950). Tartre (1984) s'appuie sur les travaux de McGee (1979) pour classer les facteurs spatiaux à partir de cette première distinction. Ainsi, « la visualisation spatiale implique de manipuler une image mentale alors que l'orientation spatiale implique de comprendre ou de donner du sens à une représentation visuelle [*Spatial visualization involves movement of a mental image, whereas spatial orientation involves comprehending or making sense of some visual representation*] » (Tartre, 1984, p. 27).

Tartre (1984) se réfère aussi à la distinction de Kersh et Cook (1979, cités dans Tartre, 1984) qui différencient la rotation mentale, qui concerne la manipulation de la totalité d'un objet, de la transformation mentale, qui porte sur la manipulation d'une partie d'un objet (p. 7). Ainsi, les tâches du *Revised Purdue Spatial Visualization Test: Rotations* (Yoon, 2011) relèvent de la rotation mentale. Les sujets doivent dans un premier temps identifier la séquence de rotations suivies par un stimulus représenté une première fois, pour arriver à la position décrite dans une seconde représentation. Il s'agit ensuite d'appliquer la même séquence de rotations à un nouvel objet. Les problèmes spatiaux du *Mental Cutting Test* (College Entrance Examination Board, 1939) portent en revanche sur des coupes de solides que le sujet doit observer pour identifier la section qui en résulte : il s'agit ici de transformation mentale.

Tartre reprend cette distinction concernant la portion de l'objet à traiter pour subdiviser l'orientation spatiale en deux facteurs (p. 15). D'une part, elle considère les situations dans lesquelles le sujet doit organiser et comprendre la totalité d'une représentation visuelle ou d'un changement d'une représentation à une autre (p. 16). Les problèmes spatiaux présentés dans le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* (Guay, 1976b) relèvent de cette compétence : il s'agit d'observer un objet en s'imaginant qu'il flotte dans un cube de verre, puis de s'imaginer ce à quoi il ressemblerait s'il était observé à partir d'un coin du cube de verre. Le deuxième facteur de l'orientation spatiale se rapporte à la capacité à comprendre la relation qu'entretient un élément avec le tout dont il est issu (Tartre, 1984, p. 19). Ainsi, dans le *Closure Flexibility Test (Concealed Figures) Form A* (Thurstone et Jeffrey, 1965), le répondant doit observer un stimulus, puis déterminer s'il est présent dans quatre motifs complexes.

Bien qu'il existe de très nombreux psychométriques normés visant à mesurer l'habileté spatiale (Eliot et Macfarlane Smith, 1983), les tests les plus souvent utilisés dans les études portant sur la modélisation volumique (Ault et John, 2010, p. 13; Kelly Jr, 2013, p. 6) sont des tests papier-crayon, créés à la main ou à la machine à écrire, non-commercialisés, dont les auteurs sont inidentifiables, décédés ou retraités. Ces tests ont d'autre part la particularité de tous mesurer la visualisation spatiale. Nous avons donc mené un long travail de communication avec les auteurs d'études récentes mentionnant l'utilisation de ces tests pour leur demander leur aide. La générosité de ces chercheurs nous a permis de collecter un certain nombre de tests, ou de variantes de tests, que nous avons complété avec des tests commercialisés par *Educational Testing Service*, et grâce au site du *Spatial Intelligence & Learning Center* (SILC) (www.silc.northwestern.edu). Cette organisation met à disposition une série de tests spatiaux à titre gracieux, ou indique les coordonnées d'auteurs de tests récents.

7. SYNTHÈSE THÉORIQUE

La définition de l'habileté spatiale ne trouve pas de consensus. Tartre (1984) propose une classification des facteurs spatiaux qui s'appuie sur une première distinction relativement consensuelle entre les compétences relevant de la manipulation mentale et celles concernant la compréhension d'un objet, quelle que soit la représentation qui en est donnée. Elle complète cette première catégorisation en proposant de s'intéresser à la portion de la représentation que l'observateur doit considérer pour manipuler ou comprendre l'objet représenté pour identifier quatre sous-facteurs : la rotation mentale, la transformation mentale, un tout réorganisé et une partie d'un champ visuel.

La figure 2 représente la classification de Tartre de ces six facteurs.

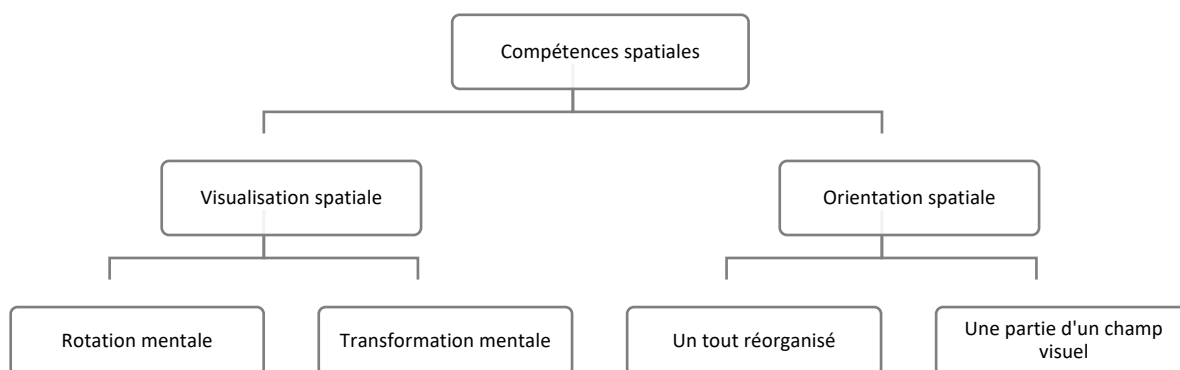


Figure 2 : Classification des compétences spatiales de tartre (1984)

Note. Représentation de la classification des habiletés spatiales. Adapté de « *The role of spatial orientation skill in the solution of mathematics problems and associated sex-related differences* » [thèse de doctorat, The University of Wisconsin-Madison, Madison, États-Unis d'Amérique] de L. A. Tartre, 1984, p. 27.

Une partie des nombreux tests spatiaux issus de la recherche sur l'habileté spatiale sont accessibles grâce à la solidarité de la communauté scientifique, quand les tests ne sont pas commercialisés.

8. LIMITES DE L'APPROCHE

Comme indiqué dans la partie 2, les premiers éléments bibliographiques de notre investigation de la littérature portant sur les habiletés spatiales et/ou la modélisation 3D ont été fournis par la fiche de poste EXAPP_3D : 82 % de ces références sont en langue anglaise. Ce chiffre permet deux interprétations : d'une part, on constate que très peu de recherches sont effectuées en francophonie sur ce sujet, et d'autre part, en conséquence de ce premier constat, une revue de la question portant sur ce sujet sera très majoritairement constituée de sources anglophones. Notre approche au fil de l'eau, accompagnée de notre maîtrise de la langue anglaise, nous a ouvert un pan de littérature à la fois conséquent, car, comme décrit dans la partie 3, la majorité des recherches sur l'habileté spatiale a eu lieu en Grande Bretagne et aux EUA, et restrictif, au sens où nous avons constitué une bibliographie très majoritairement anglophone.

9. CONCLUSION

Notre recherche portant sur la relation existant entre habiletés spatiales et compétences de modélisation volumique, nous nous sommes intéressée aux études mobilisant des outils de mesure de ces compétences. Celles-ci nous ont très vite alertée sur la difficulté à définir les différentes compétences investies dans ces termes et les outils de mesure visant à en caractériser la maîtrise, ainsi que celle à se procurer ces instruments. Dans le cas des habiletés spatiales, nous avons tenté de retracer l'histoire des recherches qui s'y sont intéressées pour mieux appréhender la complexité des facteurs qui la constituent et des tâches qui les mettent en œuvre.

L'étude de l'évolution de la définition de l'habileté spatiale donne des éléments de compréhension des activités d'apprentissage et de maîtrise qui la requièrent, des différentes tâches qui la mobilisent, et des caractéristiques des sujets qui pourraient expliquer les variations de performance potentiellement observées lorsqu'on s'essaie à mesurer la maîtrise de ces compétences. La multitude de tests existants, et cependant d'accès difficile, alerte sur la nécessité de bien définir le ou les facteurs pertinents pour une étude, et de s'assurer de la conformité de ces instruments de mesure avec les sujets observés.

Parmi les caractéristiques des sujets relevées dans la revue de littérature que nous avons ici présentée, deux études (Kozhevnikov et Hegarty, 2001; Werdelin, 1961) se sont intéressés aux processus de résolution adoptés par les sujets en situation de test. Ainsi, Kozhevnikov et Hegarty mentionnent que le test d'orientation spatiale qu'elles cherchent à développer mobilise non seulement la compétence visée, mais aussi des stratégies de rotation mentale et de calcul d'angle (p. 750). Cette observation ouvre la porte à l'exploration d'un nouveau pan de la littérature qui s'intéresse à qualifier non seulement la performance démontrée au travers de ces outils de mesure, mais aussi les processus cognitifs qui y sont mis en œuvre.

10. BIBLIOGRAPHIE

- Agbanglanon, S. (2019). *Outils numériques dans l'apprentissage de la conception mécanique : Analyse des liens entre représentations externes et capacités visuo-spatiales dans le processus de conception* [thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02623908>
- Albaret, J. M., & Aubert, E. (1996). Étalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg. *EVOLUTIONS psychomotrices*, 8(34), 269-278.
- Alexander, W. P. (1935). Intelligence, concrete and abstract. *British Journal of Psychology*, 19, 1-177.
- 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.
- Bertoline, G. R., Hartman, N., & Adamo-Villani, N. (2009). Computer-Aided Design, Computer-Aided Engineering, and Visualization. Dans *Springer Handbook of Automation* (p. 639-652). Springer.
- Binet, A., & Simon, T. (1907). Le développement de l'intelligence chez les enfants. *L'Année psychologique*, 14(1), 1-94.
- Bingham, W. V. D. (1937). *Aptitudes and aptitude testing*. Harper & Brothers.
- Bodner, G., & Guay, R. B. (1997). The Purdue Visualization of Rotations Test. *The Chemical Educator*, 2(4), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00897970138a>
- 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.
- Burt, C. (1949a). Structure of the mind : A review of the results of factor-analysis Part I. *British Journal of Educational Psychology*, 19, 100-111.
- Burt, C. (1949b). Structure of the mind : A review of the results of factor-analysis Part II. *British Journal of Educational Psychology*, 19, 176-199.
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities : A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge University Press.
- Charles, S. (2023). *Habilité spatiale et stratégies de modélisation 3D*. [thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université, France].
- 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*, 179-184.
- 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; p. 75). National Institute of Education.
- Contero, M., Naya, F., Company, P., Saorín, J. L., & Conesa, J. (2005). Improving visualization skills in engineering education—IEEE Journals & Magazine. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(5), 24-31.
- Cronbach, L. J. (1949). *Essentials of psychological testing* (p. xiii, 475). Harper.
- de-Wit, L., Huygelier, H., Hallen, R. V. der, Chamberlain, R., & Wagemans, J. (2017). Developing the Leuven Embedded Figures Test (L-EFT) : Testing the stimulus features that influence embedding. *PeerJ*, 5, e2862. <https://doi.org/10.7717/peerj.2862>
- Duroisin, N. (2015). *Quelle place pour les apprentissages spatiaux à l'école ? Etude expérimentale du développement des compétences spatiales des élèves âgés de 6 à 15 ans*

- [thèse de doctorat, Université de Mons, Belgique]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01152392>
- El Koussy, A. A. H. (1935). The Visual Perception of Space. *The British Journal of Psychology*, Monograph Supplement, 20, 1-80.
- Eliot, J. (1983). Historical background. Dans *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.
- 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.
- Fondation Jean Piaget. (2022a, février 10). *Euclidien*. Fondation Jean Piaget. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/oeuvre/index_notions_nuage.php?NOTIONID=77
- Fondation Jean Piaget. (2022b, février 10). *Projectif*. Fondation Jean Piaget. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/presentation/index_notion.php?PRESMODE=1&NOTIONID=197
- Fondation Jean Piaget. (2022c, février 10). *Topologique*. Fondation Jean Piaget. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/presentation/index_notion.php?PRESMODE=1&NOTIONID=262
- French, J. W. (1951). *The description of aptitude and achievement tests in terms of rotated factors* (Vol. 5). The University of Chicago Press.
- French, J. W. (1954). *Manual for kit of selected tests for reference aptitude and achievement factors*. Princeton, NJ: Educational Testing Service.
- 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>
- Górska, R. (2005). Spatial imagination-an overview of the longitudinal research at Cracow University of Technology. *Journal for Geometry and Graphics*, 9(2), 201-208.
- Górska, R., Sorby, S. A., & Leopold, C. (1998). Gender Differences in Visualization Skills—An International Perspective. *The Engineering Design Graphics Journal*, 62(3), Art. 3. <http://www.edgj.org/index.php/EDGJ/article/view/115>
- Guay, R. B. (1976a). *Purdue Spatial Visualization Test: Rotations*. Purdue Research Foundation.
- Guay, R. B. (1976b). *Purdue Spatial Visualization Test—Visualization of Views*. Purdue Research Foundation.
- Guay, R. B., & McDaniel, E. D. (1978). *Correlates of performance on spatial aptitude tests* (DAHC 19-77-G-0019). U. S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Hamlin, A., Boersma, N., & Sorby, S. (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*, 11.493.1-11.493.9. <https://doi.org/10.18260/1-2--1272>
- Hamon, C. (2009). Graphismes techniques : Tâches, nature et causes des difficultés des apprenants. *Aster*, 48, 39-62. <https://doi.org/10.4267/2042/30420>

- ISAE-Supméca. (2016). *Expérimenter l'Apprentissage par problèmes et Projets via la conception 3D / EXAPP_3D*. https://www.isae-supmecca.fr/imgs_cont/images/files/2013_05__26_resume_EXAPP_3D.pdf
- Kellogg, M. (s.d.). *Practical*. In Wordreference.com. <https://www.wordreference.com/enfr/practical>
- Kelly Jr, W. F. (2013). *Measurement of Spatial Ability in an Introductory Graphic Communications Course*. [thèse de doctorat, North Carolina University, États-Unis d'Amérique].
- Kohs, S. C. (1923). *Intelligence measurement*. Macmillan Company.
- 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>
- Leopold, C., Górska, R., & Sorby, S. A. (2001). International experiences in developing visualization abilities of engineering students. *Journal for Geometry and Graphics*, 5(1), 81-91.
- Liao, K.-H. (2017). The abilities of understanding spatial relations, spatial orientation, and spatial visualization affect 3D product design performance : Using carton box design as an example. *International Journal of Technology and Design Education*, 27(1), 131-147. <https://doi.org/10.1007/s10798-015-9330-3>
- 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. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1130467>
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial Ability : A Review and Reanalysis of the Correlational Literature*. (Technical Report No. 8). Stanford University, School of Education. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA075972>
- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. Dans *Advances in the psychology of human intelligence*, Vol. 4, 181-248. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Lohman, D. F. (1993). *Spatial Ability and G*. 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., Pellegrino, J. W., Alderton, D. L., & Regian, J. W. (1987). Dimensions and Components of Individual Differences in Spatial Abilities. Dans S. H. Irvine & S. E. Newstead (Éds.), *Intelligence and Cognition : Contemporary Frames of Reference* (p. 253-312). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9437-5_6
- Macfarlane Smith, I. (1964). *Spatial ability : Its Educational and Social Significance* (University of London Press Ltd).
- Maeda, Y., & Yoon, S. Y. (2013). A Meta-Analysis on Gender Differences in Mental Rotation Ability Measured by the Purdue Spatial Visualization Tests : Visualization of Rotations (PSVT:R). *Educational Psychology Review*, 25(1), 69-94. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9215-x>
- 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.

- Martín-Dorta, N., Saorín, J. L., & Contero, M. (2008). Development of a Fast Remedial Course to Improve the Spatial Abilities of Engineering Students. *Journal of Engineering Education*, 97(4), 505-513. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2008.tb00996.x>
- 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>
- McDaniel, E. D., & Guay, R. B. (1976). Spatial Abilities, Mathematics Achievement, and the Sexes. *Annual Meeting of the American Educational Research Association*.
- 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>
- Mohler, J. L., & Miller, C. L. (2008). Improving Spatial Ability with Mentored Sketching. *Engineering Design Graphics Journal*, 72(1), 19-27.
- Moreau, D., Clerc, J., Mansy-Dannay, A., & Guerrien, A. (2012). Enhancing Spatial Ability Through Sport Practice. *Journal of Individual Differences*, 33(2), 83-88. <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000075>
- 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>
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1977). *La représentation de l'espace chez l'enfant* (3e éd.). Presses Universitaires de France.
- Pilardeau, M. (2008). *Identification et validation des stratégies dans une tâche de rotation d'image mentale* [thèse de doctorat, Université Paris Descartes, France].
- Poitou, J.-P. (1984). L'évolution des qualifications et des savoir-faire dans les bureaux d'études face à la conception assistée par ordinateur. *Sociologie du travail*, 26(4), 468-481.
- Reilly, D., Neumann, D. L., & Andrews, G. (2017). Gender Differences in Spatial Ability : Implications for STEM Education and Approaches to Reducing the Gender Gap for Parents and Educators. Dans M. S. Khine (Éd.), *Visual-spatial Ability in STEM Education : Transforming Research into Practice* (p. 195-224). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44385-0_10
- Rynne, A., & Gaughran, W. F. (2007). Cognitive modeling strategies for optimum design intent in parametric modeling (PM). *Computers in Education Journal*, 18(3), 55-68.
- 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>
- Somers, M., Shields, L. S., Boks, M. P., Kahn, R. S., & Sommer, I. E. (2015). Cognitive benefits of right-handedness : A meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 51, 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.01.003>
- Sorby, S. A. (1999a). Developing 3-D Spatial Visualization Skills. *Engineering Design Graphics Journal*, 63(2), 21-32.
- Sorby, S. A. (1999b). Spatial Abilities and their Relationship to Computer Aided Design Instruction. *Proceedings of the 1999 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*, 4.465.1-4.465.6.

- Sorby, S. A. (2005). Assessment of a « New and Improved » Course for the Development of 3-D Spatial Skills. *The Engineering Design Graphics Journal*, 69(3), Art. 3. <http://www.edgj.org/index.php/EDGJ/article/view/41>
- Sorby, S. A., 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>
- Spearman, C. (1904). « General Intelligence, » Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201-292. <https://doi.org/10.2307/1412107>
- 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.
- Study, N. E. (2011). Long-Term Impact of Improving Visualization Abilities of Minority Engineering and Technology Students : Preliminary Results. *Engineering Design Graphics Journal*, 75(2), 2-8.
- Tartre, L. A. (1984). *The Role of Spatial Orientation Skill in the Solution of Mathematics Problems and Associated Sex-Related Differences*. [thèse de doctorat, The University of Wisconsin-Madison, États-Unis d'Amérique].
- 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. (1950). Some Primary Abilities in Visual Thinking. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 94(6), 517-521.
- Thurstone, L. L., & Jeffrey, T. E. (1965). *Closure Flexibility (Concealed figures) Test administration Manual*. Industrial Relations Center - The University of Chicago.
- Thurstone, L. L., & Thurstone, T. G. (1941). Factorial studies of intelligence. *Psychometric Monographs*, 2, 94-94.
- Tsutsumi, E., Shiina, K., Suzaki, 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., & Cohen, C. A. (2012). Spatial thinking and STEM education : When, why, and how? *Psychology of Learning and Motivation*, 57, 147-181.
- 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>
- Veurink, N. L., Hamlin, A. J., Kampe, J. C. M, Sorby, S. A., Blasko, D. G., Holliday-Darr, K. A., Kremer, J. D. T., Harris, L. V. A., Connolly, P. E., Sadowski, M. A., Harris, K. S., Brus, C. P., Boyle, L. N., Study, N. E., & Knott, T. W. (2009). Enhancing Visualization Skills-Improving Options and Success (EnViSIONS) of Engineering and Technology Students. *Engineering Design Graphics Journal*, 73(2), 1-17.
- 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>
- Werdelin, I. (1961). Geometrical ability and the space factors in boys and girls. U. Lund.

- 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, États-Unis d'Amérique].
<https://search.proquest.com/openview/e5c5ec5adee291928859d5158fa37e20/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Zimmerman, W.S. (1954). Hypotheses concerning the nature of spatial factors. *Educational and Psychological Measurement*, 14, 396-400.