



Habileté spatiale et stratégies de modélisation 3D

Sophie Charles

► To cite this version:

Sophie Charles. Habileté spatiale et stratégies de modélisation 3D. Education. CY Cergy Paris Université, 2023. Français. NNT : 2023CYUN1160 . tel-04097396v2

HAL Id: tel-04097396

<https://hal.science/tel-04097396v2>

Submitted on 24 Nov 2023

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.

École doctorale : Éducation Didactique et Cognition

Thèse de doctorat

Présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Sciences de l'éducation
de CY Cergy Paris Université

par
Sophie CHARLES

Habileté spatiale et stratégies de modélisation 3D

Présentée le 10 janvier 2023

Devant le Jury composé de :

Annie JÉZÉGOU	Professeure des universités, Université de Lille	Présidente
Pascale BRANDT-POMARES	Professeure des universités, Aix Marseille Université	Rapporteure
Stéphanie MAILLES VIARD METZ	Professeure des universités, Aix Marseille Université	Rapporteure
Alain JAILLET	Professeur des universités, CY Cergy Paris Université	Directeur de thèse
Alain RIVIÈRE	Professeur des universités, ISAE-Supméca	Co-directeur de thèse
Nicolas PEYRET	Professeur des universités, ISAE-Supméca	Examineur
Line NUMA-BOCAGE	Professeure des universités, CY Cergy Paris Université	Invitée
Laurent JEANNIN	Maître de conférences, CY Cergy Paris Université	Invité

Remerciements

Je souhaite remercier mes encadrants Alain JAILLET, Alain RIVIÈRE, Nicolas PEYRET et Laurent JEANNIN pour m'avoir confié et suivi dans ce travail.

Je souhaite plus particulièrement remercier mon directeur de thèse Alain JAILLET. I wish I could say this was hard fun. What I will say is that it was very very very hard, but you got me through it all. Thank you for training me, encouraging me, supporting me, challenging me, stretching me and putting up with me.

Je voudrais aussi remercier mon co-encadrant Nicolas PEYRET. Si l'on en croit la revue de littérature, encadrer un travail de recherche sur l'habileté spatiale menée par une femme, de formation littéraire et d'un certain âge, relevait du défi. Merci pour ta grande patience et pour m'avoir un peu réconciliée avec la 3D.

Un immense merci aux étudiants d'ISAE-Supméca, promotions 2021, 2022 et 2023 qui ont participé aux expérimentations et plus particulièrement à Diane, Emeline, Arthur, Marc, Samuel et Victor, qui m'ont accompagnée pendant un an dans la définition du protocole expérimental.

Je remercie aussi les personnes à ISAE-Supméca qui ont permis la réalisation des recueils : Antoine, Clémentine, Sylvain, Alexandre, Nicolas, Jérémie, Alain, ainsi que ceux qui se sont intéressés à mon travail, dont Philippe.

Je n'oublie pas mes camarades de la chaire UNESCO, Francophonie et révolution des savoirs, pour leur soutien et leurs conseils : Sandrine, Abdoul, Bapindié, et plus particulièrement Sylvain-Luc, qui a répondu présent à chacune de mes sollicitations.

Merci à Pierre-André Caron, mon directeur de mémoire de Master 2, pour m'avoir convaincue de me lancer dans cette folle aventure.

Finalement, je voudrais conclure ces remerciements par une anecdote. Lors la rédaction de l'introduction du manuscrit, j'ai demandé à Marie, ma fille, de me relire. Elle a été très surprise que j'utilise le pronom personnel « Nous ». Je lui ai expliqué que je ne menais pas seule ce travail et que mes encadrants me formaient, m'aidaient et que ce « Nous » reflétait cela. Mais j'ai aussi cherché une définition plus officielle que j'ai trouvée sur le site de *La langue française* (2010) et qui dit :

L'emploi de nous est l'usage dans les publications savantes (scientifiques et universitaires). Ce n'est pas un NOUS de majesté (même si la même règle s'applique), mais un NOUS de modestie qui rappelle que l'auteur du mémoire, de la thèse ou de l'article scientifique n'est pas parti de rien : C'est une manière de rendre hommage à ses maîtres, aux travaux des autres auteurs sur lesquels il s'est appuyé (fût-ce pour les contester)... et de prendre (un peu) de distance avec l'égo (je).

Je voudrais compléter cette définition en remerciant Bruno, Marie et Jules, mes co-auteurs, relecteurs, beta testeurs, ambassadeurs de charme, ingénieur de développement et expert Excel. Mon mari et mes enfants ont relu mes articles, écouté mes communications, réalisé la totalité de mes expérimentations, facilité les accès aux terrains, développé des programmes de traitement de données et débogué les fichiers Excel. Ce travail n'a jamais été l'affaire d'une seule personne. Il ne pouvait être écrit qu'à la première personne du pluriel.

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le projet e-FRAN EXAPP_3D et s'intéresse à caractériser les performances et l'activité d'étudiants ingénieurs engagés dans des tâches de résolution de problèmes spatiaux à différents moments de leur parcours de formation. La recherche relative au raisonnement spatial est issue de la recherche de la définition de l'intelligence et porte notamment sur la relation entre compétences spatiales et performance à des tâches spécifiques, telle la modélisation volumique.

Dans la vie courante, nous sommes régulièrement confrontés à des situations dans lesquelles nous nous appuyons sur notre compréhension et parfois notre manipulation, réelle ou virtuelle, d'objets physiques et de représentations : se repérer sur une carte, ranger des valises dans le coffre d'une voiture, monter un meuble à partir de plans. La réflexion autour de la forme et de l'objet est plus prégnante dans certaines tâches et occupations. C'est le cas pour les modelleurs 3D qui, à l'aide de logiciels adaptés, réalisent les objets imaginés par les designers. Les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) sont apparus dans le monde industriel dans les années 1980, puis dans les formations dirigées vers les métiers du design et de la conception, dont les enseignements ont évolué afin de répondre aux besoins des entreprises, notamment en matière d'outils de conception. L'apprentissage de la conception se fait désormais à l'aide des modelleurs volumiques et mobilise la compréhension de représentations d'objets et la manipulation d'outils de conception et de représentations d'objets virtuels.

Les étudiants ingénieurs d'ISAE-Supméca sont confrontés à des problèmes spatiaux dès la première année, notamment dans des enseignements dédiés à l'apprentissage de la modélisation volumique et d'outils de CAO. Bien qu'engagés dans une même formation, ces apprenants sont caractérisés par des compétences et connaissances variées, acquises notamment dans les filières post-bac qu'ils ont suivies et dans leur pratique de loisirs. Les compétences spatiales qu'ils ont développées entretiennent-elles une relation avec les tâches de modélisation volumique, individuelles et collectives, qu'ils vont rencontrer dans leurs études d'ingénierie ?

Pour répondre à cette question, notre recherche s'oriente sur la qualification de la performance des étudiants dans des tâches spatiales et de l'activité mise en œuvre dans ces tâches pour réaliser cette performance. Pour ce faire, nous mobilisons deux types de problèmes spatiaux. D'une part, ceux présentés dans des tests psychométriques visant à mesurer le résultat d'opérations spatiales mentales et d'autre part, ceux présentés dans des exercices de modélisation volumique. Nous incluons dans nos expérimentations des modalités d'évaluation de la performance des étudiants, ainsi que des observations de leur activité. Cette prise de données est complétée par l'investigation de la pratique de loisirs et de logiciels de modélisation des étudiants au travers de questionnaires. En effet, au-delà de la performance, nous nous préoccupons d'en explorer de possibles sources de variance. Ces performances et activités caractérisées, nous nous attachons ensuite à explorer la possible relation qu'elles entretiennent.

Ce protocole expérimental est déployé en deux temps : à l'arrivée des étudiants à ISAE-Supméca et à la fin du premier semestre d'enseignements. Cette mesure répétée nous permet d'explorer la potentielle malléabilité de ces compétences et processus de résolution. Les évolutions de performances sont finalement mises en regard avec les caractéristiques individuelles de nos étudiants pour en éprouver l'effet.

Abstract

This thesis is part of the e-FRAN project EXAPP_3D and aims at characterising engineering freshmen's performance and the activity they carry out in spatial tasks, at different points of their engineering course. Spatial reasoning research originates from endeavours to define intelligence and includes investigations of the relationship between spatial skills and performance in specific tasks, such as 3-D modelling.

In our everyday life, we are regularly confronted to situations requiring our understanding and sometimes manipulation, whether physical or virtual, of physical objects and representations: finding one's bearings on a map, fitting suitcases in the boot of a car, assembling furniture from instructions. Spatial reasoning is more present in certain tasks and professions. 3-D modellers for example need to create objects, previously imagined by designers, with the help of dedicated software programmes. Computer-assisted design tools first came to prominence in the industrial world in the 1980s, before integrating design courses, developed to meet professional needs. Design learning is now carried out through 3-D modelling software and draws on the understanding of object representations and the manipulation of design tools and the virtual objects they generate.

ISAE-Supméca's students are exposed to spatial problems as soon as they join the school, for example in 3-D modelling courses. Although the students take the same courses, the skills and knowledge they have acquired through their previous studies and extra-curricular activities differ. Do the spatial skills they have so far developed relate to their ability to complete the individual and collective 3-D modelling tasks they encounter in their engineering studies?

To address this question, our investigations seek to characterise these students' performance in spatial tasks and what they do while completing these tasks. They include psychometric tests aiming at assessing the product of mental spatial operations and 3-D modelling exercises. Our experiments include measures of performance and filmed observations of the students' activity. This data collection is completed with questionnaires investigating the students' extra-curricular activities and 3-D modelling software experience. The purpose of the questionnaires is to explore possible sources of variance in performance and solving strategies. Once we have characterised the students' performance and activity, we intend to explore the relationship between those two manifestations.

This set of experiments is carried out at the beginning of the school year and at the end of the first term of the first-year programme. This repeated-measure design provides the opportunity to explore the malleability of spatial and modelling skills, and the solving strategies involved. The evolutions in performance are then compared with the students' individual characteristics to test their potential effect.

Table des matières

PREAMBULE	14
NOTE DU DIRECTEUR DE THESE	16
INTRODUCTION	18
CHAPITRE 1. CONTEXTE DE LA RECHERCHE.....	24
1.1 EXAPP_3D	24
1.2 PROJET SCIENTIFIQUE.....	25
CHAPITRE 2. L'HABILETE SPATIALE	28
2.1 HISTORIQUE DE LA RECHERCHE SUR L'HABILETE SPATIALE	28
2.1.1 <i>Phase I – 1904-1938</i>	28
2.1.2 <i>Phase II – 1938-1961</i>	29
2.1.3 <i>Phase III – 1961-1982</i>	30
2.1.4 <i>Phase IV - 1982-présent</i>	31
2.2 DEFINITION DE L'HABILETE SPATIALE	32
2.2.1 <i>La classification de Tartre (1984)</i>	33
2.2.2 <i>La visualisation spatiale</i>	34
2.2.3 <i>L'orientation spatiale</i>	36
2.3 SYNTHESE.....	38
CHAPITRE 3. MESURER L'HABILETE SPATIALE	40
3.1 TESTS MESURANT LA VISUALISATION SPATIALE	40
3.1.1 <i>Tests mesurant la rotation mentale</i>	40
3.1.2 <i>Test mesurant la transformation spatiale</i>	42
3.2 TESTS MESURANT L'ORIENTATION SPATIALE.....	43
3.2.1 <i>Tests mesurant Un tout réorganisé</i>	43
3.2.2 <i>Tests mesurant Une partie d'un tout</i>	45
3.3 NORMES D'ADMINISTRATION	46
3.4 SYNTHESE DU CHAPITRE	47
CHAPITRE 4. APPRENTISSAGE DE LA MODELISATION 3D A L'AIDE DE MODELEURS VOLUMIQUES	48
4.1 LA CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR : UN OUTIL DU MONDE PROFESSIONNEL	48
4.2 LA MODELISATION VOLUMIQUE	49
4.2.1 <i>Historique de la CAO</i>	49
4.2.2 <i>Fonctionnement des modeleurs volumiques</i>	51
4.2.3 <i>Séquence de création d'une pièce</i>	52
4.3 L'APPRENTISSAGE DE LA MODELISATION 3D	52
4.3.1 <i>Connaissances extrinsèques à la modélisation volumique</i>	53
4.3.2 <i>Connaissances intrinsèques à la modélisation volumique</i>	53
4.3.3 <i>Connaissances déclaratives et procédurales</i>	54
4.4 SYNTHESE DE CE CHAPITRE	54
CHAPITRE 5. PREMIERES EXPERIMENTATIONS	56
5.1 IDENTIFICATION ET ACQUISITION DES TESTS SPATIAUX.....	56
5.2 EXPERIMENTATIONS DES TESTS SPATIAUX.....	57
5.2.1 <i>Expérimentation A</i>	57
5.2.2 <i>Expérimentation B</i>	59
5.3 SYNTHESE DES PREMIERES EXPERIMENTATIONS	60
CHAPITRE 6. STRATEGIES DE RESOLUTION DE PROBLEMES PRESENTES DANS LES TESTS SPATIAUX	62
6.1 DEFINITION DE STRATEGIE DE RESOLUTION DE PROBLEME SPATIAL	62
6.2 INVESTIGATION DES STRATEGIES AU TRAVERS DES VERBALISATIONS	63
6.3 INVESTIGATION DES STRATEGIES AU TRAVERS DE L'OBSERVATION DES MANIFESTATIONS PHYSIQUES	66
6.4 INVESTIGATION DES ETAPES CONSTITUTIVES D'UNE STRATEGIE	67

6.5	L'APPROCHE COMPONENTIELLE.....	68
6.6	STRATEGIE ANALYTIQUE VERSUS STRATEGIE HOLISTIQUE	69
6.7	L'AFFORDANCE DES TESTS.....	71
6.7.1	<i>Affordance des tests QCM.....</i>	71
6.7.2	<i>Affordance de la limite de temps de réponse.....</i>	72
6.7.3	<i>Affordance des stimuli.....</i>	72
6.8	SYNTHESE DU CHAPITRE	73
CHAPITRE 7.	STRATEGIES DE MODELISATION	78
7.1	DEFINITION DE STRATEGIE.....	78
7.2	ÉLÉMENTS DE DECISION DANS LE CHOIX D'UNE STRATEGIE DE MODELISATION	79
7.3	INVESTIGATIONS DES STRATEGIES DE MODELISATION 3D.....	80
7.4	SYNTHESE.....	83
CHAPITRE 8.	CARACTERISER L'ACTIVITE	88
8.1	THEORIE DE L'ACTIVITE.....	88
8.2	ANALYSE DE L'ACTIVITE	88
8.3	ANALYSE DES TRACES.....	89
8.4	SYNTHESE.....	90
CHAPITRE 9.	PROBLEMATIQUE RETRAVAILLEE	94
9.1	PROBLEMATIQUE INITIALE.....	94
9.2	ÉVOLUTION DE LA METHODOLOGIE.....	95
9.3	PLAN DE RECHERCHE	96
CHAPITRE 10.	METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DE L'HABILETE SPATIALE	98
10.1	IDENTIFICATION DES STRATEGIES DE RESOLUTION.....	99
10.2	SELECTION DES TESTS.....	101
10.3	CONCEPTION DES QUESTIONNAIRES STRATEGIES.....	101
10.3.1	<i>Questionnaires à choix multiples Stratégies.....</i>	102
10.3.2	<i>Questionnaires ouverts Stratégies.....</i>	102
10.4	EXPERIMENTATIONS ET STABILISATION DES QUESTIONNAIRES STRATEGIES.....	104
10.5	DESCRIPTION DU TERRAIN D'ETUDE.....	104
CHAPITRE 11.	CONSTRUCTION DE LA METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DE LA MODELISATION	
VOLUMIQUE	106	
11.1	EXPERIMENTATION MV1.....	106
11.1.1	<i>Sélection du modeleur volumique.....</i>	106
11.1.2	<i>Conception du tutoriel de prise en mains.....</i>	107
11.1.3	<i>Modalité d'observation de l'activité.....</i>	109
11.1.4	<i>Expérimentations MV1A et MV1B.....</i>	110
11.1.5	<i>Validation du tutoriel et sélection de la modalité de passage.....</i>	110
11.2	EXPERIMENTATION MV2.....	110
11.2.1	<i>Modalité d'observation de l'activité.....</i>	111
11.2.2	<i>Sélection de l'échantillon.....</i>	111
11.2.3	<i>Validation du protocole expérimental.....</i>	112
CHAPITRE 12.	METHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNEES EXTRINSEQUES.....	114
12.1	QUESTIONNAIRE LOISIRS	114
12.1.1	<i>Identification des loisirs.....</i>	114
12.1.2	<i>Choix des temporalités.....</i>	114
12.1.3	<i>Ajout des variables prévalence manuelle et logiciels de modélisation pratiqués.....</i>	115
12.1.4	<i>Expérimentations et validation des questionnaires.....</i>	115
12.2	COLLECTE DE DONNEES SOCIODEMOGRAPHIQUES	117
12.3	COLLECTE DE DONNEES RELATIVES A LA PERFORMANCE ACADEMIQUE	117
12.4	NIVEAU D'ANGLAIS.....	117
12.5	SYNTHESE DES VARIABLES EXTRINSEQUES RELEVÉES.....	118

CHAPITRE 13. PROTOCOLE RETENU ET COLLECTE DES DONNEES	120
13.1 TESTS SPATIAUX	121
13.1.1 <i>Ordre de passage</i>	121
13.1.2 <i>Modalités</i>	121
13.2 QUESTIONNAIRES STRATEGIES	123
13.3 QUESTIONNAIRES LOISIRS	124
13.4 FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	124
13.5 EXPERIMENTATION D'UNE ACTIVITE DE MODELISATION 3D	124
13.6 PARTICIPATION DES ETUDIANTS	125
13.6.1 <i>Recueil 1 – septembre 2019</i>	125
13.6.2 <i>Recueil 2- décembre 2019</i>	126
13.6.3 <i>Recueil 3 - mars 2020</i>	126
CHAPITRE 14. TRAITEMENT DES DONNEES BRUTES ISSUES DES TESTS SPATIAUX ET DES QUESTIONNAIRES STRATEGIES	128
14.1 TRAITEMENT DES SCORES SPATIAUX	128
14.1.1 <i>Calcul des scores spatiaux</i>	128
14.1.2 <i>Évolution de la performance aux tests spatiaux</i>	128
14.2 ENCODAGE DES QUESTIONNAIRES OUVERTS STRATEGIES	128
14.2.1 <i>Conception de la grille d'encodage</i>	128
14.2.2 <i>Encodage et traitement des verbatim issus des questionnaires ouverts Stratégies</i>	130
14.2.3 <i>Nombre et changement de stratégies</i>	133
14.2.4 <i>Synthèse des variables issues de l'encodage des verbatim</i>	134
14.3 ENCODAGE ET TRAITEMENT DES QUESTIONNAIRES A CHOIX MULTIPLES STRATEGIES	134
14.3.1 <i>Synthèse des variables issues de l'encodage des QCM</i>	136
CHAPITRE 15. TRAITEMENT DES DONNEES BRUTES ISSUES DES QUESTIONNAIRES LOISIRS ET DES DONNEES EXTRINSEQUES.....	138
15.1 ENCODAGE ET TRAITEMENT DES QUESTIONNAIRES LOISIRS.....	138
15.1.1 <i>Catégorisation des loisirs</i>	138
15.1.2 <i>Affectation d'un indice aux catégories</i>	141
15.1.3 <i>Synthèse des variables relatives aux loisirs</i>	143
15.2 VARIABLES EXTRINSEQUES ISSUES DU QUESTIONNAIRE LOISIRS	143
15.3 AUTRES VARIABLES EXTRINSEQUES.....	144
15.3.1 <i>Genre</i>	144
15.3.2 <i>Filière d'origine</i>	144
15.3.3 <i>Nombre de langues maternelles</i>	145
15.3.4 <i>Niveau d'anglais</i>	146
15.3.5 <i>Notes des enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO</i>	146
15.3.6 <i>Synthèse des autres variables extrinsèques</i>	147
CHAPITRE 16. TRAITEMENT DES DONNEES BRUTES ISSUES DES MODELISATIONS REALISEES A L'AIDE D'ONSHAPE.....	148
16.1 ÉVALUATION DES MODELISATIONS	148
16.1.1 <i>Critères dimensionnels</i>	150
16.1.2 <i>Critères géométriques</i>	151
16.1.3 <i>Critères fonctionnels</i>	151
16.1.4 <i>Synthèse des variables relevées</i>	151
16.2 ÉVOLUTION DE LA PERFORMANCE A L'EXERCICE DE MODELISATION	152
16.3 CARACTERISATION DES STRATEGIES DE MODELISATION A PARTIR DES EVALUATIONS ET DE L'ARBRE DE CONSTRUCTION.....	152
16.3.1 <i>Définition de la longueur totale</i>	152
16.3.2 <i>Perçage de la clavette</i>	154
16.3.3 <i>Performance et stratégies</i>	156
16.3.4 <i>Synthèse des variables relevées dans l'arbre de construction et dans les esquisses</i>	157
CHAPITRE 17. TRAITEMENT DES VIDEOS DE MODELISATION.....	160

17.1	ENCODAGE 1.....	160
17.2	ENCODAGE 2.....	163
17.3	ENCODAGE 3.....	163
17.4	ENCODAGE 4.....	163
17.5	CREATION DE DIMENSIONS RELATIVES A PLUSIEURS INDICATEURS	165
17.6	TEMPS DE REALISATION	166
17.7	SYNTHESE DES VARIABLES ISSUES DE L'ENCODAGE DES VIDEOS.....	166
17.8	TRAITEMENT DES VIDEOS DU TRAVAIL DE GROUPE DE LA SEANCE DE MODELISATION AVEC LE MODELEUR VOLUMIQUE CATIA.....	167
CHAPITRE 18.	PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE ET DES HYPOTHESES	170
18.1	VARIABLES INTRINSEQUES	170
18.2	VARIABLES EXTRINSEQUES.....	171
18.3	SYNTHESE DES DONNEES.....	171
18.4	HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	172
18.4.1	<i>Lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles (hypothèses HS)</i>	173
18.4.2	<i>Lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles (hypothèses MV)</i>	174
18.4.3	<i>Évolutions en habileté spatiale suite à des enseignements en école d'ingénieurs (hypothèses EHS)</i>	175
18.4.4	<i>Évolutions en modélisation volumique suite à des enseignements en école d'ingénieurs (hypothèses EMV)</i>	176
18.4.5	<i>Étude qualitative de la performance en modélisation volumique à partir de l'encodage d'un échantillon de vingt-huit vidéos (hypothèses EQMV)</i>	177
CHAPITRE 19.	LIEN ENTRE PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX ET CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES	180
19.1	VERIFICATION DE LA NORMALITE	180
19.2	HYPOTHESE HABILETE SPATIALE 1 (HS1) : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AU GENRE	182
19.3	HYPOTHESE HS2 : LES ETUDIANTS ISSUS DE FORMATIONS INCLUANT DES ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES PERFORMENT MIEUX AUX TESTS SPATIAUX QUE LES ETUDIANTS ISSUS DE FORMATIONS NE COMPRENANT PAS D'ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES	184
19.4	HYPOTHESE HS3 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE A LA PREVALENCE MANUELLE	185
19.5	HYPOTHESE HS4 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AU NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES.....	185
19.6	HYPOTHESE HS5 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE A LA PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION.	187
19.7	HYPOTHESE HS6 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AU NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION VOLUMIQUE PRATIQUES.....	187
19.8	HYPOTHESE HS7 : LA PERFORMANCE SPATIALE EST LIEE A LA PRATIQUE DE CERTAINES CATEGORIES DE LOISIRS DURANT L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE.....	188
19.8.1	<i>Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence</i>	189
19.8.2	<i>Loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence</i>	190
19.8.3	<i>Loisirs en 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence</i>	191
19.8.4	<i>Loisirs avec construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence</i>	192
19.8.5	<i>Loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence</i>	193
19.9	HYPOTHESE HS8 : LA PERFORMANCE SPATIALE EST LIEE A LA PRATIQUE REGULIERE DE CERTAINES CATEGORIES DE LOISIRS AU MOMENT DE LA PRISE DE DONNEES.....	194
19.9.1	<i>Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués à l'âge adulte</i>	194
19.9.2	<i>Loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte</i>	195
19.9.3	<i>Loisirs en 2D pratiqués à l'âge adulte</i>	196
19.9.4	<i>Loisirs avec construction 3D pratiqués à l'âge adulte</i>	197
19.9.5	<i>Loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte</i>	198
19.10	HYPOTHESE HS9 : LA PERFORMANCE SPATIALE EST LIEE AU NIVEAU D'ANGLAIS.....	199
19.11	HYPOTHESE HS10 : LES ETUDIANTS DECLARENT MOBILISER PLUSIEURS STRATEGIES DANS UN TEST.	201
19.11.1	<i>Variable extraite à partir des verbatim Stratégies</i>	201
19.11.2	<i>Variable extraite à partir des QCM Stratégies</i>	203
19.12	HYPOTHESE HS11 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AU NOMBRE DE STRATEGIES MOBILISEES.....	205

19.12.1	Hypothèse HS11a : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées issu des verbatim Stratégies	206
19.12.2	Hypothèse HS11b : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées issu des QCM Stratégies.....	206
19.13	HYPOTHESE HS12 : LA PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AUX COMBINAISONS DE STRATEGIES MOBILISEES : CERTAINES COMBINAISONS SONT PLUS EFFICACES QUE D'AUTRES.	208
19.14	HYPOTHESE HS13 : LES ETUDIANTS CHANGENT DE STRATEGIE AU SEIN D'UN TEST.....	209
19.15	HYPOTHESE HS14 : LES ETUDIANTS DECLARANT CHANGER DE STRATEGIES AU SEIN D'UN MEME TEST PERFORMENT MIEUX QUE LES ETUDIANTS QUI UTILISENT TOUJOURS LA MEME STRATEGIE.	210
19.16	RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CE CHAPITRE.....	211
19.17	SYNTHESE DES RESULTATS DE CE CHAPITRE	215
CHAPITRE 20. LIEN ENTRE PERFORMANCE A UN EXERCICE DE MODELISATION VOLUMIQUE ET CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES		220
20.1	VERIFICATION DE LA NORMALITE	220
20.1.1	Scores de modélisation	220
20.1.2	Scores d'habileté spatiale.....	221
20.2	HYPOTHESE MV1 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE AU GENRE.	222
20.3	HYPOTHESE MV2 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE A LA FORMATION.	222
20.4	HYPOTHESE MV3 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE A LA PREVALENCE MANUELLE.	223
20.5	HYPOTHESE MV4 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE AU NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES	223
20.6	HYPOTHESE MV5 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE A LA PRATIQUE ANTERIEURE DE LOGICIELS DE MODELISATION	224
20.7	HYPOTHESE MV6 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE AU NOMBRE DE LOGICIELS PRATIQUES.	224
20.8	HYPOTHESE MV7 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE A LA PRATIQUE DE CERTAINES CATEGORIES DE LOISIRS DURANT L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	224
20.8.1	Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence	225
20.8.2	Loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence	225
20.8.3	Loisirs en 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence	225
20.8.4	Loisirs avec construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.....	225
20.8.5	Loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence	225
20.9	HYPOTHESE MV8 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE A LA PRATIQUE DE CERTAINES CATEGORIES DE LOISIRS AU MOMENT DE LA PRISE DE DONNEES.	226
20.9.1	Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués à l'âge adulte	226
20.9.2	Loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte	226
20.9.3	Loisirs en 2D pratiqués à l'âge adulte.....	226
20.9.4	Loisirs avec construction 3D pratiqués à l'âge adulte	227
20.9.5	Loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte	228
20.10	HYPOTHESE MV9 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE AU NIVEAU D'ANGLAIS.	228
20.11	HYPOTHESE MV10 : LA CAPACITE A PRODUIRE LES SIX VOLUMES FONCTIONNELS EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	230
20.12	HYPOTHESE MV11 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	231
20.13	HYPOTHESE MV12 : LE NOMBRE DE CERCLES PRODUITS EST LIE AUX SCORES SPATIAUX.....	235
20.14	HYPOTHESE MV13 : LE NOMBRE D'ESQUISSES PRODUITES EST LIE AUX SCORES SPATIAUX.	236
20.15	HYPOTHESE MV14 : LE NOMBRE D'EXTRUSIONS PRODUITES EST LIE AUX SCORES SPATIAUX.	237
20.16	HYPOTHESE MV15 : LA STRATEGIE DE PERÇAGE DE LA CLAVETTE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	238
20.17	HYPOTHESE MV16 : LA CATEGORIE NOMBRE DE VOLUMES – PERÇAGE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	239
20.18	HYPOTHESE MV17 : LA CATEGORIE NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES – PERÇAGE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	240
20.19	HYPOTHESE MV18 : LA CATEGORIE NOMBRE DE VOLUMES – EXTRUSIONS – PERÇAGE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.....	242
20.20	HYPOTHESE MV19 : LA STRATEGIE DE LONGUEUR TOTALE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	243
20.21	HYPOTHESE MV20 : LA CAPACITE A CONTRAINDRE LA SYMETRIE DE LA PIECE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	244
20.22	HYPOTHESE MV21 : LA CATEGORIE LONGUEUR TOTALE – SYMETRIE EST LIEE AUX SCORES SPATIAUX.	245
20.23	HYPOTHESE MV22 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION EST LIEE A LA STRATEGIE DE PERÇAGE DE LA CLAVETTE.	246
20.24	HYPOTHESE MV23 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION EST LIEE A LA STRATEGIE DE LONGUEUR TOTALE.	246

20.25	HYPOTHESE MV24 : LA PERFORMANCE EN MODELISATION EST LIEE A LA STRATEGIE LONGUEUR TOTALE - SYMETRIE.	247
20.26	RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CE CHAPITRE.....	247
20.27	SYNTHESE DES RESULTATS DE CE CHAPITRE	250
CHAPITRE 21. ÉVOLUTIONS EN HABILETE SPATIALE SUITE A DES ENSEIGNEMENTS EN ECOLE		
D'INGENIEURS SPECIALISEE EN MECANIQUE		254
21.1	VERIFICATION DE LA NORMALITE	254
21.2	HYPOTHESE EHS1 : LES SCORES DES TESTS SPATIAUX ONT EVOLUE ENTRE LES DEUX PRISES DE DONNEES.	255
21.2.1	<i>Effet d'entraînement</i>	256
21.2.2	<i>Caractérisation des évolutions.....</i>	257
21.2.3	<i>Effet de la performance initiale</i>	258
21.3	HYPOTHESES EHS2-EHS18 : L'ÉVOLUTION DES SCORES AUX TESTS SPATIAUX EST LIEE AUX CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES.	258
21.3.1	<i>Hypothèses EHS2 et EHS3 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au genre et à la prévalence manuelle.....</i>	261
21.3.2	<i>Hypothèses EHS4, EHS5 et EHS6 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la formation antérieure, à la pratique antérieure de logiciels de modélisation et au nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca.....</i>	263
21.3.3	<i>Hypothèses EHS7 et EHS8 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles et au score de TOEIC.....</i>	266
21.3.4	<i>Hypothèse EHS9 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.....</i>	269
21.3.5	<i>Hypothèse EHS10 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiques à l'âge adulte</i>	275
21.3.6	<i>Hypothèse EHS16, EHS17 et EHS18 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies, au changement de stratégies et aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées au second recueil dans les verbatim.</i>	283
21.4	RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CE CHAPITRE.....	286
21.5	SYNTHESE DES RESULTATS	290
CHAPITRE 22. ÉVOLUTIONS EN MODELISATION VOLUMIQUE SUITE A DES ENSEIGNEMENTS EN ECOLE		
D'INGENIEURS SPECIALISEE EN MECANIQUE		294
22.1	VERIFICATION DE LA NORMALITE	294
22.2	HYPOTHESE EMV1 : LES SCORES DE L'EXERCICE DE MODELISATION ONT EVOLUE ENTRE LES DEUX PRISES DE DONNEES.	295
22.2.1	<i>Effet d'entraînement</i>	295
22.2.2	<i>Effet de la performance initiale</i>	296
22.3	HYPOTHESE EMV2-EMV16 : L'ÉVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION EST LIEE AUX CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES.	296
22.3.1	<i>Hypothèses EMV2 et EMV3 : L'évolution des scores de modélisation est liée au genre et à la prévalence manuelle.....</i>	297
22.3.2	<i>Hypothèses EMV4, EMV5 et EMV6 : L'évolution des scores de modélisation est liée à la formation, à la pratique antérieure de logiciels de modélisation et au nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca.....</i>	297
22.3.3	<i>Hypothèses EMV7 et EMV8: L'évolution des scores de modélisation est liée au nombre de langues maternelles et au score de TOEIC.....</i>	300
22.3.4	<i>Hypothèse EMV9 : L'évolution des scores de modélisation est liée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.....</i>	301
22.3.5	<i>Hypothèse EMV10 : L'évolution des scores de modélisation est liée aux loisirs pratiques à l'âge adulte.....</i>	301
22.3.6	<i>Hypothèse EMV11, EMV12, EMV13, EMV14 et EMV15: L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.</i>	305
22.3.7	<i>Hypothèse EMV16 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à l'évolution des scores spatiaux.</i>	305
22.4	HYPOTHESE EMV17 : LA STRATEGIE DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE DE LA PIECE DES ETUDIANTS EVOLUE..	306
22.5	RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CE CHAPITRE.....	307
22.6	SYNTHESE DES RESULTATS DE CE CHAPITRE	309

CHAPITRE 23. ÉTUDE QUALITATIVE DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE A PARTIR DE L'ENCODAGE D'UN ECHANTILLON DE VINGT-HUIT VIDEOS	310
23.1 VERIFICATION DE LA NORMALITE	310
23.2 HYPOTHESE EQMV1 : LA PERFORMANCE EST LIEE AU NOMBRE D' ACTIONS AVORTEES.....	311
23.3 HYPOTHESE EQMV2 : LA PERFORMANCE EST LIEE AU NOMBRE D'ERREURS.....	311
23.4 HYPOTHESE EQMV3 : LA PERFORMANCE EST LIEE A LA CAPACITE A FACTORISER CERTAINES ACTIONS.	312
23.5 HYPOTHESE EQMV 4 : LA PERFORMANCE EST LIEE AU NOMBRE D' ACTIONS.	313
23.6 HYPOTHESE EQMV 5 : LA PERFORMANCE EST LIEE AU TEMPS DE REALISATION.	313
23.7 HYPOTHESE EQMV6 : LES SCORES DE L'EXERCICE DE MODELISATION ONT PROGRESSE SIGNIFICATIVEMENT ENTRE LES DEUX PRISES DE DONNEES.	314
23.8 HYPOTHESE EQMV7 : LES ETUDIANTS SONT PLUS RAPIDES AU DEUXIEME RECUEIL.	314
23.9 HYPOTHESE EQMV 8 : LES ETUDIANTS REALISENT MOINS D' ACTIONS AU DEUXIEME RECUEIL.	315
23.10 HYPOTHESE EQMV 9 : LES ETUDIANTS SONT PLUS EFFICACES AU DEUXIEME RECUEIL.	315
23.11 HYPOTHESE EQMV 10 : LES ETUDIANTS TATONNENT PLUS AU DEUXIEME RECUEIL.	316
23.12 RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CE CHAPITRE.....	316
23.13 SYNTHESE DES RESULTATS DE CE CHAPITRE	317
CHAPITRE 24. DISCUSSION DES RESULTATS.....	320
24.1 LIEN ENTRE PERFORMANCE AUX TESTS SPATIAUX ET CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES	320
24.1.1 <i>Variables extrinsèques</i>	320
24.1.2 <i>Variables intrinsèques</i>	323
24.1.3 <i>Synthèse</i>	325
24.2 LIEN ENTRE PERFORMANCE A UN EXERCICE DE MODELISATION VOLUMIQUE ET CARACTERISTIQUES INDIVIDUELLES.....	328
24.2.1 <i>Performance en modélisation et habileté spatiale</i>	328
24.2.2 <i>Performance en modélisation et caractéristiques sociodémographiques</i>	329
24.2.3 <i>Performance en modélisation et formation post-bac</i>	329
24.2.4 <i>Stratégies de modélisation et habileté spatiale</i>	330
24.2.5 <i>Synthèse</i>	332
24.3 ÉVOLUTIONS EN HABILITE SPATIALE SUITE A DES ENSEIGNEMENTS EN ECOLE D'INGENIEURS SPECIALISEE EN MECANIQUE	333
24.3.1 <i>Caractérisation de l'évolution de la performance spatiale</i>	334
24.3.2 <i>Relation entre évolution des scores et variables extrinsèques</i>	334
24.3.3 <i>Évolution des scores spatiaux et performance académique</i>	337
24.3.4 <i>Évolution des scores et stratégies de résolution</i>	338
24.3.5 <i>Synthèse</i>	338
24.4 ÉVOLUTIONS EN MODELISATION VOLUMIQUE SUITE A DES ENSEIGNEMENTS EN ECOLE D'INGENIEURS SPECIALISEE EN MECANIQUE	341
24.4.1 <i>Caractérisation de l'évolution de la performance en modélisation volumique</i>	341
24.4.2 <i>Évolution en modélisation volumique et variables extrinsèques</i>	342
24.4.3 <i>Évolution en modélisation volumique et performance académique</i>	343
24.4.4 <i>Évolution en modélisation volumique et stratégies de modélisation</i>	343
24.4.5 <i>Évolution en modélisation volumique et évolution des scores spatiaux</i>	344
24.4.6 <i>Synthèse</i>	344
24.5 ÉTUDE QUALITATIVE DE L'ACTIVITE DE MODELISATION VOLUMIQUE A PARTIR DE L'ENCODAGE D'UN ECHANTILLON DE VINGT-HUIT VIDEOS.....	344
24.5.1 <i>Indicateurs de stratégie</i>	345
24.5.2 <i>Indicateurs de performance</i>	346
24.5.3 <i>Synthèse</i>	347
CHAPITRE 25. LIMITES ET PERSPECTIVES	348
25.1 LIMITES.....	348
25.1.1 <i>Terrain et contexte</i>	348
25.1.2 <i>Protocole de collecte des données</i>	348
25.1.3 <i>Traitement des données</i>	349
25.2 PERSPECTIVES.....	349
CONCLUSION.....	352

BIBLIOGRAPHIE	356
LISTE DES FIGURES	370
LISTE DES TABLEAUX	372
ANNEXES.....	378

Préambule

ISAE-Supméca est une école d'ingénieurs spécialisée en mécanique, qui forme ses étudiants à la modélisation volumique et les expose au travail de groupe au travers d'enseignements répondant à une approche Apprentissage par Problèmes et Projets (APP) dès la première année. En 2012, l'école est lauréate d'un financement Initiatives D'Excellence en Formation Innovantes (IDEFI) pour son projet PLAtforme Collaborative d'Ingénierie Système (PLACIS). Les projets IDEFI doivent être « emblématiques et innovants en matière d'enseignement supérieur » (Agence nationale de la recherche, 2011). L'objectif de PLACIS « consiste en la création, le développement et l'expérimentation d'une plateforme internationale collaborative pour l'ingénierie systèmes » (Institut Polytechnique Grand Paris, s.d.). Le projet vise à faire travailler en groupes des étudiants d'établissements d'enseignement supérieur dans des pays différents, sur des cas concrets fournis par des industriels, pour les préparer à l'ingénierie systèmes. Ces projets bénéficient de modules systèmes et collaboratifs, e.g. CATIA V6 (Dassault Systèmes, 2011). PLACIS cherche notamment à faire « dialoguer des environnements académiques, de recherche et d'entreprise » (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, 2011) au travers d'une pédagogie innovante et c'est pourquoi il s'appuie sur une approche pédagogique d'Apprentissage par Projet, l'utilisation du numérique, le partenaire industriel Dassault Systèmes, des entreprises, e.g. Bosch et des partenaires académiques, e.g. CY Tech, Politecnico di Torino.

Fort de ces expériences, l'école s'engage en 2016 dans un projet e-FRAN dans le but « d'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). Cette opération est soutenue par l'État dans le cadre du volet e-FRAN du programme d'Investissement d'avenir, opéré par la Caisse de Dépôts. Le projet lauréat EXpérimenter l'Apprentissage par Problèmes et Projets via la conception 3D (EXAPP_3D) s'organise autour de situations pédagogiques orientées vers la résolution, en groupes d'apprenants inter-établissements, de problèmes mettant en œuvre notamment des outils de modélisation volumique, grâce au partenaire industriel Dassault Systèmes, et de robotique éducative, produits par le partenaire Cogibot. Le projet permet des collaborations entre des apprenants issus de différents établissements, tels des collèges et des lycées professionnels et techniques ou encore des Sections de Technicien Supérieur (STS) et des écoles d'ingénieurs. Ces expériences visent à aider des élèves issus d'établissements de territoires en difficulté à poursuivre leurs études et leur insertion professionnelle.

NOTE DU DIRECTEUR DE THESE

La formulation des perspectives de recherche en termes d'accompagnement du projet EXAPP-3D, pour évaluer les résultats des dispositifs pédagogiques, a fait l'objet d'une étude année 0, de ce travail de thèse. La problématique de base de cette année 0 consistait à vérifier la faisabilité de l'élaboration d'un dispositif d'évaluation rigoureux qui pourrait concilier plusieurs contraintes. La première de celle-ci concerne l'existence d'un consensus scientifique sur la question de la relation entre les compétences en « raisonnements spatiaux » qui recouvrent plusieurs aptitudes présentées par ailleurs dans ce travail, les performances scolaires mesurées dans différentes disciplines, croisées avec la capacité à utiliser un logiciel de modélisation 3D. Cet aspect est la centration première du projet et par ailleurs une question de recherche d'importance.

L'issue de cette première année a permis d'établir qu'il n'était pas possible de se baser sur un consensus, car les recherches qui ont travaillé à l'articulation des trois domaines de compétences font apparaître de très nombreuses nuances, et désaccords. Pour être plus précis, l'étude qui fera l'objet d'un article par ailleurs, montre qu'un consensus de surface accrédité par une domination de référencement, cache en fait une complexité bien plus difficile à maîtriser et qui ne permet en tout cas pas de reprendre des résultats sans les vérifier en contexte.

La seconde contrainte, concernait les possibilités de caractériser suffisamment précisément, ce que l'on appelle la situation didactique observée et ses arrières plans. Ceux-là concernent tout à la fois les caractéristiques interindividuelles des élèves et des enseignants de sorte d'isoler ce qui relèvent des facteurs non strictement liés à la problématique traitée. Pour ce qui concerne la situation didactique, il s'agirait d'être en capacité de déterminer une triple perspective, la construction-progression des apprentissages selon les objectifs attendus ; la caractérisation fine des actes et actions des élève-étudiants en regard des attentes ; la maîtrise pédagogique et didactique des encadrants. Les recherches en didactique sur toutes sortes d'objets didactiques sont bien documentées et ont fait l'objet de consensus suffisamment stables pour pouvoir être reprises et adaptées. Cela impose, absolument, un contexte suffisamment stable dans la durée pour que les variabilités interindividuelles ne viennent perturber l'étude des différents facteurs. Cela impose également que les savoirs adossés à ce que l'on étudie, en l'occurrence les compétences spatiales et les compétences manipulatoires d'un logiciel 3D, soient suffisamment stabilisés. J'ai dit précédemment qu'il n'était pas possible de l'assurer à l'issue d'un travail approfondi d'une année sur cette question. Pour ce qui concerne la stabilité des compétences des encadrants sur cette question, il n'était absolument pas possible de l'assurer dans la durée des expérimentations.

La troisième contrainte avec laquelle, il fallait pouvoir composer, concernait la neutralisation de l'effet projet, qui impose des effectifs cumulés comparatifs impossibles à garantir. Depuis plus de 100 ans, les praticiens maîtrisent les effets en termes d'apprentissage d'une approche projet. Autrement dit, et de manière caricaturale, l'organisation en projet de tout apprentissage produit toujours des effets qui seront en dépendance des habiletés d'encadrement de l'enseignant. Ainsi, il est possible de découvrir des notions de mathématiques, de lettres ou de toute discipline selon une approche projet de n'importe quel type, à la condition que celui qui la met en œuvre en maîtrise les pièges. L'un des écueils les plus fréquents, concerne par exemple les modalités de travail des élèves-étudiants au cœur de ces approches de projets. Les encadrants néophytes partant sur une pétition de principe courante du travail en commun sont très souvent aveuglés par la réussite d'une tâche collective pour le transformer en indicateur d'apprentissage individuel de chacun des membres. De très nombreuses recherches ont montré

un savoir connu pourtant depuis très longtemps, que la juxtaposition découpée des réalisations pour une tâche collective aboutit à un effet motivation collectif majoritairement, mais ne garantit absolument pas la progression dans les apprentissages de chacun de ceux qui constituent le groupe. C'est la différence que l'on fait entre coopération et collaboration, que, par inexpérience ou parfois incompetence, on cherche à confondre car mettre en place des situations didactiques de projets qui sont à même d'impliquer chacun dans toutes les tâches est une compétence pédagogique et didactique de très haut niveau. Se faire opérer de l'appendicite, mérite un travail de coopération très rigoureux et important, mais qui ne garantira jamais que ce sera le brancardier qui peut réaliser l'opération sans risque. En matière pédagogique, ce serait une faute de concevoir une situation d'apprentissage dans laquelle, à l'issue de celle-ci on pourrait garantir, que l'un sait allumer la machine, seulement, et qu'un autre sait réaliser la modélisation.

La maîtrise-contrôle de cet effet projet revient, soit dans un premier temps à accompagner, former les encadrants à éviter les pièges et ensuite mettre en œuvre des expérimentations, soit à disposer d'une multitude de groupes tests et témoins avec une ingénierie de contrôle des effets compétences des enseignants. A l'évidence ce n'était pas le sujet du projet et rien ne garantissait la faisabilité du projet. Dès lors, chercher à mettre en évidence que l'effet projet existe, cela peut se faire sur tous les sujets et pas moins, ni plus, sur la question des habiletés spatiales et la manipulation d'un logiciel de conception 3D.

Par conséquent, j'assume la responsabilité d'avoir convaincu l'équipe d'encadrement EXAPP_3D que la variabilité de la distribution des observables était telle que, dans le format d'une thèse, il n'était pas raisonnable d'évaluer les résultats obtenus avec fiabilité, c'est-à-dire sans écarter la possibilité de mesurer des effets liés à la nature des projets.

Dès lors, il s'agissait de prendre la responsabilité d'orienter la recherche sur la première étape nécessaire, celle qui consiste à chercher à neutraliser d'éventuels effets préalables à la manipulation de logiciel 3D, d'observer s'il existe des effets enseignements et progression, tout d'abord avec un public le plus uniforme qu'il soit, et donc mobilisant avec un maximum de rigueur le public de ISAE-Supméca. Pour ensuite, adapter l'outil de mesure aux élèves de collège.

Bien sûr la troisième phase qui consiste à étudier expérimentalement des sessions de manipulation d'un modèleur 3D, en groupe et individuellement aussi bien d'abord avec les élèves d'ISAE-Supméca, a été conduite également pour en étudier les liens éventuels avec les autres facteurs. De même qu'a été conçu la même chose pour les élèves de collèges. La période COVID a remis en cause la facilité de mettre en œuvre le tout jusqu'à son point final. Alors qu'en même temps, il s'est très vite révélé évident que trois thèses pleines composaient le travail. Celle de l'identification des variables caractéristiques des apprentissages en lien avec les habiletés spatiales et la manipulation d'un logiciel de Manipulation 3D ; celle des interactions dans une situation d'apprentissage complexe en groupe ; celle de l'impact de l'utilisation d'un modèleur 3D sur les habiletés spatiales et des compétences transversales. En tant que directeur de thèse, il convient de décider qu'on détermine une thèse avec un sujet et pas trois, même au prix de décevoir ou déplaire aux financeurs. La déontologie qui encadre à présent le travail du chercheur, lui enjoint absolument à ne pas se mettre dans une situation dans laquelle le mensonge par omission ou le contournement de problématique par facilité est la seule solution pour parvenir à produire des résultats. Il convient donc au directeur de thèse de fixer une limite atteignable avec rigueur, c'est ce que j'ai fait.

Introduction

Ce travail de thèse s'inscrit dans le projet EXAPP_3D et s'intéresse à caractériser les performances et l'activité d'apprenants engagés dans des tâches de résolution de problèmes spatiaux à différents moments de leur parcours de formation. La recherche relative au raisonnement spatial est issue de la recherche de la définition de l'intelligence (Eliot, 1983, p. 1) et de la découverte du facteur spatial (Alexander, 1935 cité dans Eliot, 1983, p. 2; Kohs, 1923 cité dans Eliot, 1983, p. 2). Cette percée permet à plusieurs pistes d'investigation d'être explorées. L'une d'entre elles concerne le lien entre compétences spatiales et performance académique (Wai *et al.*, 2009) : les auteurs s'appuient sur un échantillon de 346 665 sujets issus de la cohorte *Project Talent* (Flanagan *et al.*, 1961) pour montrer que la probabilité d'obtenir un bachelor, un master ou un doctorat en Sciences, Technologie, Ingénierie et Mathématiques (STIM) augmente en fonction de l'habileté spatiale mesurée entre 14 et 18 ans (p. 825). D'autres études portent sur la relation entre compétences spatiales et performance à des tâches spécifiques, telle la modélisation volumique (Branoff et Dobelis, 2012b) : la mise en regard du score obtenu à un exercice de modélisation volumique et de celui obtenu au *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations* (PSVT:R) (Guay, 1976a), un test visant à mesurer la rotation mentale, met en évidence une corrélation significative (p. 41). D'autres encore étudient l'efficacité de dispositifs pédagogiques visant à développer les compétences spatiales (Martín-Dorta *et al.*, 2008) : ses auteurs constatent une augmentation significative de la performance au *Mental Rotation Test* (MRT) (Vandenberg et Kuse, 1978), un test visant à mesurer la rotation mentale, et au *Differential Aptitude Test: Space Relations* (DAT:SR) (Bennett *et al.*, 1947), un test visant à évaluer la transformation mentale, après que des étudiants ont suivi une formation de remise à niveau des compétences spatiales basée sur l'utilisation du modèleur volumique Google SketchUp (version 5) (p. 510). À l'aide de tests psychométriques, ces études évaluent le produit de l'activité engagée dans ces tâches, c'est-à-dire la performance des sujets.

Alors que nous prenons connaissance de ces études, nous entreprenons dans un premier temps de nous procurer ces outils de mesure, qui pour la plupart ne sont plus édités. Au fur et à mesure que nous les acquérons, nous menons une série d'expérimentations de manière à explorer d'une part la faisabilité de tâches qui y sont présentées auprès de différents publics, e.g. collégiens, étudiants ingénieurs, étudiants en master Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation (MEEF) spécialisé en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS), professionnels, et d'autre part l'activité qui y est mise en œuvre. Nous demandons à nos sujets de répondre aux questions posées dans des tests spatiaux, tel le MRT, les filmons en situation et les interrogeons sur leurs stratégies après qu'ils ont complété les tests. Les observations filmées et les entretiens posttest mettent en lumière une divergence de procédés de résolution : certains déclarent s'imaginer manipuler les stimuli, d'autres accompagnent cette réflexion de gestes spontanés, d'autres encore s'attachent à identifier des éléments saillants pour comparaison. Une expérimentation à grande échelle est menée auprès de 137 étudiants ingénieurs en première année à ISAE-Supméca et montre des relations significatives entre performance académique et la performance à trois tests spatiaux, i.e. deux tests de rotation mentale, le MRT et le *Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations* (R PSVT:R) (Yoon, 2011), et un test de transformation mentale, le *Special Aptitude test in Spatial Relations* (College Entrance Examination Board, 1939), plus communément nommé *Mental Cutting Test* (MCT) (Charles *et al.*, 2019, sect. Résultats et discussion). Suite à ces résultats préliminaires, nous décidons de recentrer notre attention sur des variables intrinsèques au raisonnement spatial : face aux tâches présentant des problèmes spatiaux, quels processus

cognitifs met-on en place pour tenter de les résoudre ? En d'autres mots, que mesurent les tâches visant à évaluer le raisonnement spatial ?

Dans la vie courante, nous sommes régulièrement confrontés à des situations dans lesquelles nous nous appuyons sur notre compréhension et parfois notre manipulation, réelle ou virtuelle, d'objets physiques et de représentations : faire un puzzle, se repérer sur une carte, ranger des valises dans le coffre d'une voiture, monter un meuble à partir de plans, interpréter un histogramme (Hegarty, 2010, p. 265; Newcombe, 2017, p. 6; Uttal *et al.*, 2013, p. 352). Cette réflexion autour de la forme et de l'objet, de ce qui les définit, de leur emplacement dans l'espace et des transformations qu'on peut leur apporter, est le sujet d'investigations qui s'efforcent à la définir et à qualifier sa mise en œuvre (Guay et McDaniel, 1978; Hegarty, 2018; Just et Carpenter, 1984; McGee, 1979; Pilardeau, 2008; Shepard et Metzler, 1971; Tartre, 1984; Thurstone, 1950). Au travers de tests psychométriques, on y cherche à évaluer la performance d'individus engagés dans des tâches visant à mobiliser un raisonnement spatial. Les différences de performance qui y sont constatées posent la question des sources de variance et, par extension, de la relation qu'elle entretient avec la performance scolaire, académique et professionnelle (Eliot, 1987; Górska *et al.*, 1998; Wai *et al.*, 2009) : si certains individus sont plus prédisposés à réaliser certaines tâches, quelles sont leurs caractéristiques et sont-ils plus enclins à réussir et à s'engager dans certaines formations, dans certaines professions ?

La réflexion autour de la forme et de l'objet est plus prégnante dans certaines tâches et occupations (Gold *et al.*, 2018, p. 1; Hegarty, 2010, p. 266). C'est le cas pour les architectes quand ils conçoivent les plans de bâtiments, les dentistes quand ils posent des couronnes, les designers quand ils conçoivent des boîtes en carton ou encore les modelleurs 3D qui, à l'aide de logiciels adaptés, réalisent les objets imaginés par les designers. Les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) sont apparus dans le monde industriel dans les années 1980, puis dans les formations dirigées vers les métiers du design et de la conception, dont les enseignements ont évolué afin de répondre aux besoins des entreprises, notamment en matière d'outils de conception (Ault et John, 2010, p. 13; Barr, 2012, p. 116; Brown, 2009, p. 54; Hamon, 2009, p. 40; Leopold, 2005, p. 40; Poitou, 1984, p. 478; Sorby, 1999a, p. 21). L'apprentissage de la conception se fait désormais à l'aide des modelleurs volumiques et mobilise la compréhension de représentations d'objets et la manipulation d'outils de conception et de représentation d'objets virtuels.

Les étudiants ingénieurs d'ISAE-Supméca sont confrontés à des problèmes spatiaux dès la première année, notamment dans des enseignements dédiés à l'apprentissage de la modélisation volumique et d'outils de CAO. Bien qu'engagés dans une même formation, ces apprenants sont caractérisés par des compétences et connaissances variées, acquises notamment dans les filières post-bac qu'ils ont suivies et dans leur pratique de loisirs. Les compétences spatiales qu'ils ont développées entretiennent-elles une relation avec les tâches de modélisation volumique, individuelles et collectives, qu'ils vont rencontrer dans leurs études d'ingénierie ?

Pour répondre à cette question, notre recherche s'oriente dans un premier temps sur la qualification de la performance des étudiants dans des tâches spatiales et de l'activité mise en œuvre dans ces tâches pour réaliser cette performance. Pour ce faire, nous mobilisons deux types de problèmes spatiaux. D'une part, ceux présentés dans des tests psychométriques visant à mesurer le résultat d'opérations spatiales mentales et d'autre part, ceux présentés dans des exercices de modélisation volumique, qui nécessitent la compréhension de représentations et la manipulation de logiciels spécifiques. Nous incluons dans nos expérimentations des modalités d'évaluation de la performance des étudiants, ainsi que des observations de leur activité.

L'évaluation des compétences spatiales est effectuée au travers de cinq tests psychométriques : le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* (PSVT:V) (Guay, 1976b), le R PSVT:R, le MRT, le MCT et le *Closure Flexibility Test (Concealed Figures) Form A* (CFT) (Thurstone et Jeffrey, 1965). Elle est accompagnée de questionnaires, ouverts et fermés, interrogeant les processus qu'ils ont mobilisés pour résoudre ces problèmes. Ces prises d'information nous permettent de recueillir des données brutes concernant la performance, alors que le traitement des questionnaires, soit l'encodage des réponses collectées, nous renseigne sur les stratégies adoptées par les étudiants dans les tests spatiaux. La seconde expérimentation consiste en l'observation filmée de l'activité des étudiants durant un exercice de modélisation en ligne, ce qui nous donne accès à leurs réalisations et à des enregistrements de leur activité. L'évaluation des modélisations réalisées par les étudiants nous informe sur leur performance, alors que l'encodage des vidéos nous éclaire sur les stratégies qu'ils mettent en place dans ces réalisations.

Cette première prise de données est complétée par l'investigation de la pratique de loisirs et de logiciels de modélisation des étudiants au travers de questionnaires et la collecte d'informations concernant les caractéristiques individuelles des étudiants auprès des services de scolarité de l'école. En effet, au-delà de la performance, nous nous préoccuons d'en explorer de possibles sources de variance : la performance est-elle liée à la formation antérieure des étudiants, à leur pratique de certains loisirs, à leur genre, à leur pratique de certains outils, aux processus cognitifs qu'ils mettent en œuvre dans ces tâches ?

Ces performances et activités caractérisées, nous nous attachons ensuite à explorer la possible relation qu'elles entretiennent : la performance en modélisation est-elle liée à la performance aux tests spatiaux ? La performance en modélisation est-elle liée aux stratégies mobilisées dans les tests spatiaux ? Les stratégies de modélisation sont-elles liées à la performance aux tests spatiaux ? Les stratégies de modélisation sont-elles liées aux stratégies mobilisées dans les tests spatiaux ?

Ce protocole expérimental est déployé en deux temps : à l'arrivée des étudiants à ISAE-Supméca et à la fin du premier semestre d'enseignements. Cette mesure répétée nous permet d'explorer la potentielle malléabilité de ces compétences et processus de résolution : les performances et stratégies mobilisées dans les tests spatiaux évoluent-elles suite à des enseignements comprenant l'apprentissage de la modélisation volumique ? Les performances et stratégies mobilisées dans l'exercice de modélisation volumique évoluent-elles suite à des enseignements comprenant l'apprentissage de la modélisation volumique ? Cette potentielle évolution de la performance en modélisation volumique est-elle liée à une éventuelle évolution de la performance aux tests spatiaux ? Les évolutions de performances sont finalement mises en regard avec les caractéristiques individuelles de nos étudiants pour en éprouver l'effet.

Les deux premiers recueils ayant concerné des tâches expérimentales individuelles, nous complétons notre étude avec l'observation d'une activité de groupe, lors d'un enseignement organisé selon une approche pédagogique par problème : les étudiants y travaillent collectivement à la résolution d'un problème de dimensionnement d'un mécanisme nécessitant l'utilisation d'un modèleur volumique. Nous souhaitons caractériser les échanges qui y ont lieu et qui concernent la dimension spatiale du problème, puis étudier si leur nature et leur volume sont liés aux capacités spatiales des étudiants et à leurs stratégies de résolution.

L'organisation de ce manuscrit suit le cheminement que nous avons suivi pour mener cette recherche. Il est construit autour de neuf parties, divisées en vingt-cinq chapitres. Les quatre premiers chapitres concernent la première revue de littérature que nous avons entreprise, alors que le chapitre 5 décrit les premières expérimentations que nous avons menées. Celles-ci ont conduit à une seconde revue de littérature, décrite dans les chapitres 6 à 8. Le chapitre 9 présente la problématique, alors que la cinquième partie décrit la méthodologie de recueil de données dans les chapitres 10 à 13. La sixième partie aborde la méthodologie de traitement des données dans les chapitres 14 à 17. Les hypothèses et résultats sont présentés dans la septième partie, dans les chapitres 18 à 23. Le chapitre 24 discute les résultats et le chapitre 25 présente les limites et perspectives de ce travail.

Nous présentons ci-dessous un bref descriptif des chapitres.

Dans le **chapitre 1**, nous présentons le contexte de la recherche, les objectifs des projets e-FRAN en général et ceux du projet EXAPP_3D en particulier. Il présente aussi l'orientation scientifique qui a été donnée à ce travail de recherche dans ce contexte.

Nous retraçons dans le **chapitre 2** l'historique de la recherche sur l'habileté spatiale et les définitions qui s'y rapportent. Nous y décrivons ensuite la classification des compétences spatiales de Tartre (1984).

Le **chapitre 3** décrit plusieurs outils visant à mesurer les compétences spatiales incluses dans le modèle de Tartre.

Le **chapitre 4** présente l'apparition et l'évolution de la modélisation volumique, le fonctionnement des modeleurs et les connaissances déterminées nécessaires à leur utilisation par les enseignants de modélisation.

Nous décrivons dans le **chapitre 5** les premières expérimentations que nous avons menées au fur et à mesure que nous nous sommes procurée des tests psychométriques visant à mesurer l'habileté spatiale. Ces premières observations nous encouragent à élargir notre champ d'exploration de la littérature.

Le **chapitre 6** traite des stratégies de résolution des tâches présentées dans les tests spatiaux, telles qu'observées chez des sujets en activité. Il décrit aussi les différences approches mises en place pour observer et qualifier ces stratégies.

Le **chapitre 7** est consacré aux stratégies de modélisation, telles qu'observées chez des apprenants et des professionnels et telles que préconisées par les enseignants de modélisation volumique. Il décrit aussi les différences approches mises en place pour observer et qualifier ces stratégies.

Nous présentons dans le **chapitre 8** les cadres théoriques de la théorie de l'activité, de l'analyse de l'activité et de l'analyse des traces, qui permettent de qualifier, d'analyser et de caractériser certains observables.

Nous développons dans le **chapitre 9** la problématique de ce travail, définie dans un premier temps à partir de notre première revue de littérature et que nos premières expérimentations ont mené à redéfinir grâce à l'exploration d'une bibliographie plus large.

Le **chapitre 10** présente la méthodologie que nous avons déterminée pour recueillir les données utiles pour qualifier la performance d'étudiants ingénieurs en première année d'études à des tests visant à mesurer les compétences spatiales, ainsi que l'activité mise en œuvre dans ces tâches. Il détaille le choix des tests spatiaux retenus et la conception des questionnaires visant à identifier les stratégies de résolution adoptées dans ces tests.

Dans le **chapitre 11** est décrite la méthodologie que nous avons définie pour recueillir les données utiles pour caractériser la performance et l'activité mise en œuvre dans des situations de modélisation volumique par des étudiants ingénieurs en première année d'études. Les recueils concernent aussi bien des situations de modélisation individuelle, que des situations de travail collectif.

Le **chapitre 12** détaille la méthodologie que nous avons déterminée pour recueillir des données relatives aux caractéristiques individuelles de nos sujets. D'une part, les loisirs qu'ils ont pratiqués dans l'enfance et l'adolescence, ainsi qu'à l'âge adulte au travers de questionnaires. D'autre part, des données concernant la performance académique et les caractéristiques sociodémographiques des étudiants.

Nous décrivons dans le **chapitre 13** le protocole expérimental retenu et déployé en trois prises de données : à l'arrivée des étudiants à l'école, à la fin du premier semestre de cours et au cours de leur second semestre.

Le **chapitre 14** présente la méthodologie d'extraction des données issues des tests spatiaux et des questionnaires concernant les stratégies adoptées dans ces tests. Il s'agit du traitement des scores et de l'encodage des réponses aux questionnaires.

Nous détaillons dans le **chapitre 15** le traitement des données issues des questionnaires interrogeant les loisirs et des données extrinsèques collectées auprès des services de l'école.

Le **chapitre 16** décrit le traitement des données issues des réalisations disponibles sur la plateforme de modélisation, après que les étudiants ont complété l'exercice de modélisation individuelle. Il concerne l'évaluation des réalisations et la catégorisation de stratégies de modélisation relatives à la définition de la longueur totale de la pièce et au perçage de la clavette.

Nous présentons dans le **chapitre 17** la méthodologie utilisée pour encoder les vidéos des modélisations, individuelles et collectives, et le traitement des données issues de cet encodage.

Le **chapitre 18** regroupe les variables issues des traitements des données brutes et présentent les hypothèses de recherche que nous posons pour répondre à notre problématique de recherche.

Nous décrivons dans le **chapitre 19** les traitements statistiques réalisés pour éprouver les hypothèses relatives à l'Habileté Spatiale (HS), explorant la relation entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles, ainsi que la relation entre performance aux tests spatiaux et stratégies de résolution.

Le **chapitre 20** présente les traitements statistiques réalisés pour éprouver les hypothèses relatives à la Modélisation Volumique (MV), explorant la relation entre performance à l'exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles, ainsi que la relation entre performance en modélisation et stratégies de modélisation.

Nous abordons dans le **chapitre 21** les traitements statistiques réalisés pour éprouver les hypothèses relatives à l'Évolution de l'Habilité Spatiale (EHS), explorant la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles, la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et performance aux enseignements reçus au premier semestre et la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et stratégies de résolution.

Le **chapitre 22** décrit les traitements statistiques réalisés pour éprouver les hypothèses relatives à l'Évolution de la Modélisation Volumique (EMV), explorant la relation entre évolution en performance en modélisation et caractéristiques individuelles, la relation entre évolution en performance modélisation et performance aux enseignements reçus au premier semestre et la relation entre évolution en performance en modélisation et stratégies de modélisation.

Dans le **chapitre 23**, nous étudions l'activité de modélisation d'un échantillon de vingt-huit étudiants au travers des données produites par l'encodage des vidéos issues de la captation de leur activité à l'écran et du filmage de la partie supérieure de leur corps.

Dans le **chapitre 24**, nous discutons les résultats obtenus à l'issue de nos traitements, tout d'abord en les confrontant à notre revue de littérature chaque fois que possible, puis en proposant nos interprétations, en lien avec les particularités de notre terrain et de nos expérimentations. Nous y abordons les résultats relatifs à la performance spatiale et à la performance en modélisation et à l'évolution de l'habileté spatiale et de la performance en modélisation à l'issue du premier semestre d'enseignements reçus à ISAE-Supméca. Finalement, nous abordons l'étude qualitative que nous avons effectuée à partir de l'encodage des vidéos de modélisation d'un échantillon restreint de vingt-huit étudiants ayant participé aux deux premiers recueils.

Nous décrivons dans le **chapitre 25** les limites de ce travail, dues au contexte de la recherche et à nos choix méthodologiques. Nous abordons d'une part les spécificités de notre terrain et de nos collectes de données, puis les traitements que nous avons effectués. Nous traitons dans un deuxième temps les perspectives de recherche suite à ces premiers travaux exploratoires.

Chapitre 1. Contexte de la recherche

La mission Monteil, une mission interministérielle sur le numérique éducatif, lance l'appel à projets e-FRAN, espaces de Formation, de Recherche et d'Animation Numériques, en octobre 2015, dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir. Cet appel à projets vise à « identifier les effets, positifs et négatifs, de l'utilisation du numérique dans les pratiques d'enseignement et d'apprentissage, afin d'enrichir le clavier de réponses de l'enseignant pour augmenter sa liberté de praticien » (Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique et Commissariat général à l'investissement, 2016, p. 3). Pour ce faire, les projets :

- peuvent associer des « collèges, écoles, collèges, lycées (éducation nationale et enseignement agricole, établissements publics et établissements privés sous contrat), collectivités territoriales, entreprises du numérique, école supérieure du professorat et de l'éducation, association ou institution d'intérêt éducatif (GIP, GIE...), établissements d'enseignement supérieur et organismes de recherche » (Caisse des Dépôts, 2015, p. 8) ;
- doivent s'appuyer « sur un partenariat avec des équipes de recherche (laboratoires d'universités ou instituts de recherche publics ou privés, cabinets spécialisés), susceptibles d'apporter leur expertise pour contribuer à la construction des expérimentations et à l'évaluation des résultats obtenus » (Caisse des Dépôts, 2015, p. 8) ;
- peuvent porter sur « le numérique comme objet de recherche : en appui aux initiatives prises, déploiement d'un projet de recherche permettant un suivi précis et une évaluation susceptible de mesurer la pertinence des démarches, leur contribution à la réussite des élèves et d'éclairer ainsi les prises de décision futures » (Caisse des Dépôts, 2015, p. 9).

1.1 EXAPP_3D

Parmi les vingt-deux lauréats, le projet EXpérimenter l'Apprentissage par Problèmes et Projets via la conception 3D (EXAPP_3D), porté par l'école d'ingénieurs spécialisée en mécanique ISAE-Supméca, a pour objectif « d'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). Ce projet réunit ISAE-Supméca, des établissements du secondaire de l'Académie de Créteil, les partenaires industriels Dassault Systèmes et Cogibot, un Centre de ressources pour la Technologie (CRTec) et l'Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation (INSPÉ) de l'académie de Créteil. L'outil numérique engagé est la plateforme collaborative 3DEXPERIENCE (Dassault Systèmes, 2012a) du partenaire industriel Dassault Systèmes.

Le projet s'appuie sur une approche pédagogique d'apprentissage par projets et problèmes en vue de faire travailler ensemble des élèves de collège, de lycées et d'enseignement supérieur de l'académie de Créteil. Cette démarche pédagogique s'appuie sur des outils de modélisation volumique collaboratifs dans l'objectif de faciliter la poursuite d'études ou l'insertion professionnelle des élèves impliqués. La complexité des réalisations est variable en fonction des niveaux d'enseignement engagés, comme en témoignent ces exemples de réalisations :

- conception et fabrication de mini serres partagées entre des élèves de collège de différents niveaux ;
- amélioration, re-conception et fabrication de prothèse de main bionique partagées entre des collégiens, des lycéens, des étudiants en BTS et des étudiants ingénieurs ;
- conception de la structure d'un avion-taxi à décollage vertical partagée entre des étudiants en BTS et des étudiants ingénieurs.

Selon les établissements, les outils de modélisation mobilisés sont des applications reprenant le contenu du modèleur CATIA (Dassault Systèmes, 2012b) hébergées sur la plateforme 3DEXPERIENCE, le logiciel de modélisation SolidWorks (SolidWorks, 1995) ou le logiciel de modélisation SketchUp (Schell et Esch, 2000).

1.2 Projet scientifique

ISAE-Supméca s'associe à la plateforme TechsoLab de CY Cergy Paris Université afin de codiriger une recherche doctorale en sciences de l'éducation adossée au projet. Cette plateforme est spécialisée en technologies numériques en milieu éducatif et réalise notamment des analyses d'impact de nouvelles technologies numériques sur les apprenants et les enseignants. TechsoLab est dirigée par Alain Jaillet et Laurent Jeannin, membres du laboratoire de recherche transdisciplinaire Bien-être Organisation Numérique Habitabilité Éducation Universalité Relations Savoirs (BONHEURS, EA 7517) de CY Cergy Paris Université.

Cet accompagnement scientifique doit veiller à la dimension évaluative du projet dans le cadre du cahier des charges défini par e-FRAN. Il s'agit ici d'évaluer les résultats de dispositifs pédagogiques qui, selon les partenariats inter-établissement réalisés, impliquent :

- des regroupements d'élèves de différents niveaux de collège, de lycées, de BTS et d'école d'ingénieurs ;
- des thématiques traitant notamment de l'agriculture urbaine, des transports et de la santé ;
- des conceptions de complexité variable ;
- des outils de modélisation différents : SketchUp, SolidWorks, CATIA.

La variabilité de la distribution des observables a convaincu l'équipe d'encadrement de la thèse de l'impossibilité d'évaluer les résultats obtenus avec fiabilité, c'est-à-dire sans écarter la possibilité de mesurer des effets liés à la nature des projets, comme décrit dans la Note du directeur. L'équipe encadrante choisit d'explorer la relation liant les compétences de représentation spatiale et les capacités de modélisation 3D. Cette problématique s'inscrit dans une tradition scientifique de recherche de définition de l'intelligence (Spearman, 1904; Thurstone, 1938a), de la genèse de l'intelligence (Piaget et Inhelder, 1977) et de démonstration de la valeur prédictive des tests psychométriques dans la réussite et l'orientation scolaire et professionnelle (Wai *et al.*, 2009).

Le contexte scientifique de la recherche, décrit dans la fiche de poste, en Annexe 1, est situé dans un corps d'études investiguant la relation entre capacités de représentation d'objets en 2D ou en 3D, mesurables notamment à l'aide de tests psychométriques, et :

- activités pédagogiques mobilisant des outils de visualisation 3D (Ault et John, 2010 ; Martín-Dorta, Saorín, et Contero, 2008 ; Onyancha, Derov, et Kinsey, 2009 ; S. Sorby, Casey, Veurink, et Dulaney, 2013 ; Veurink *et al.*, 2009) ;

- genre (Cooke-Simpson et Voyer, 2007; Tsutsumi *et al.*, 2005) ;
- créativité dans le cadre de conception assistée par ordinateur (Chang, 2014; Geronimi *et al.*, 2005).

Nous nous intéressons dans un premier temps à des recherches consacrées à décrire la relation entre modélisation volumique et habileté spatiale. Trois études (Branoff et Dobelis, 2012b; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012) s'intéressent à la relation entre performance spatiale et performance en modélisation 3D, Hamlin *et al.* (2006) se penchent sur le lien entre performance spatiale et perception des apprenants de leur facilité à apprendre à utiliser les modeleurs volumiques et Agbanglanon (2019) étudie la relation entre performance spatiale et stratégies de résolution de dyades, impliquées dans un exercice d'amélioration de systèmes mécaniques à l'aide d'un modeleur volumique. Ces études abordent l'habileté spatiale sous l'angle de la performance à des tests psychométriques visant à mesurer des compétences spatiales spécifiques.

La lecture de ces études nous mène à poser une première question : qu'est-ce que l'habileté spatiale ? Comment la définit-on ? Et puisqu'il s'agit d'habileté, comment la mesure-t-on ? S'en suit un long de travail d'identification des outils mesure s'y rapportant. Malgré un nombre important de tests spatiaux (Eliot et Macfarlane Smith, 1983), peu d'entre eux sont encore édités de nos jours. Ces tests sont destinés à des publics d'âges variés et visent à mesurer des compétences différentes selon le cadre théorique dont ils sont issus. C'est pourquoi nous les expérimentons auprès de sujets de différentes natures alors que nous les obtenons. Ces premières expérimentations révèlent des stratégies de résolution variant selon les sujets et selon les items traités dans un test. Nous orientons alors notre étude de littérature vers des recherches portant sur la variété de stratégies de résolution adoptées dans les tests spatiaux et les dispositifs expérimentaux mis en place pour les caractériser.

Nous adoptons ensuite un procédé plus direct pour aborder la modélisation 3D. Nous orientons une première recherche vers la littérature concernant la définition de la modélisation 3D, puis vers des études décrivant des protocoles d'évaluation de la performance en modélisation et d'observation d'activités de modélisation. Il s'agit de caractériser à la fois la performance mesurée dans les tests spatiaux et les exercices de modélisation, et l'activité qui y est mise en œuvre pour l'atteindre, pour en identifier les potentielles sources de variance, avant de s'intéresser à la relation qui existe entre la réalisation de ces tâches de nature spatiale.

Le choix du terrain est déterminé à partir de facteurs de calendrier, de durabilité du terrain et de potentialité de maîtrise et de contrôle des variables. Pour ces raisons, le choix du public s'oriente vers les étudiants ingénieurs de première année d'ISAE-Supméca, qui présentent une diversité de parcours avant intégration de l'école pertinente pour la problématique.

Les protocoles définis et déployés sur ce terrain ont pour vocation à être mis à échelle pour un public collégien en vue d'étudier la répliquabilité des résultats. Cette partie de la recherche n'a pu être menée en raison de la crise sanitaire apparue en 2020.

Chapitre 2. L'habileté spatiale

Comme décrit au chapitre 1, plusieurs enseignants de CAO considèrent que la capacité à utiliser les modeleurs volumiques efficacement est liée à la capacité à comprendre les représentations numériques relatives à la taille, à la forme, et à l'orientation (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 642), à comprendre des représentations graphiques (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 6) et à décomposer des formes géométriques (Rynne et Gaughran, 2007, p. 55). En d'autres mots, cette activité nécessite la capacité à comprendre, reconnaître, manipuler et générer des représentations d'objets en 2D et en 3D. Ces compétences sont regroupées sous le terme générique habileté spatiale à laquelle est consacré ce chapitre. Nous y aborderons l'historique de la recherche qui porte sur ce sujet et les définitions qui s'y rapportent.

Le champ des disciplines couvert par les recherches portant sur le lien entre habileté spatiale et STIM est large : dentisterie (Hegarty, Keehner, Khooshabeh et Montello, 2009), architecture (Berkowitz, Gerber, Thurn, Emo, Hoelscher et Stern, 2021), chimie (Bodner et Guay, 1997), géologie (Gold *et al.*, 2018). Nous limiterons notre investigation des recherches portant sur l'habileté spatiale à celles qui traitent de la relation qu'elle entretient avec la modélisation volumique d'une part et des sources de variance dans la performance aux outils utilisés pour la mesurer d'autre part.

2.1 Historique de la recherche sur l'habileté spatiale

Le début de l'étude de l'habileté spatiale est associée aux travaux sur l'imagerie de Galton (1883) (Eliot, 1983, p. 1; Michael *et al.*, 1957, p. 185; Tartre, 1990b, p. 27). Eliot (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, caractérisée par la recherche de différences entre les facteurs spatiaux identifiés ;
- une troisième phase de 1961 à 1982, caractérisée par l'étude des sources de variance qui affectent la performance dans les tests spatiaux et la relation existant entre l'habileté spatiale et les autres habiletés (Eliot, 1983, p. 1).

Une synthèse de la description des trois phases identifiées par cet auteur est présentée ci-dessous.

2.1.1 Phase I – 1904-1938

Eliot débute la première phase avec la conception de la méthode factorielle par Spearman en 1904 (p. 1). Celle-ci lui permet d'aboutir à la théorie des deux facteurs : chaque test d'intelligence¹ peut être analysé selon un facteur unique commun à tous les tests, le facteur général G, et d'un autre 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 des deux facteurs de Spearman permet la mise au jour d'une habileté, mécanique ou pratique, dans les

¹ 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).

travaux de Kohs et Alexander (Alexander, 1935 cité dans Eliot, 1983, p. 2; Kohs, 1923 cité dans Eliot, 1983, p. 2).

En 1905, Binet et Simon publient leur Échelle métrique d'intelligence, qui inclut des questions de raisonnement sur des formes, et qui constitue l'un des premiers tests de l'habileté spatiale (Binet et Simon, 1907; Lohman, 1993, p. 5). Les tests d'intelligence de l'époque visent habituellement les compétences verbales et c'est le déploiement des tests de performance² *Examination Beta de the United States Army*, destinés à évaluer les candidats peu éduqués ou aux compétences langagières faibles, qui 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 général de l'intelligence principal, 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, Thurstone 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 imaginably in two or in three dimensions*] » (Thurstone et Thurstone, 1941, p. 4). Parallèlement 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 conclut à l'existence du 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 établissent l'existence d'un facteur spatial et ont produit de nombreux tests visant à le mesurer, concluent cette première période (Eliot, 1983, p. 3).

2.1.2 Phase II – 1938-1961

La seconde période décrite par Eliot (1983, section Phase II) est distinguée par une recherche de sous-facteurs composant l'habileté spatiale, et d'une prolifération des tests papier-crayon, soit des tests auxquels le sujet répond en écrivant ou dessinant sa réponse (Cronbach, 1949a, 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 entraîne un besoin urgent de sélectionner un grand nombre de personnel militaire, dont des candidats aptes à voler ou à entretenir des avions. De nombreux tests sont alors développés et leurs résultats sont étudiés. En 1949, Thurstone et Thurstone (cité dans Eliot, 1983; cité dans Zimmerman, 1954, p. 396) identifient les facteurs *S1*, qui représente l'habileté à visualiser des configurations rigides quand elles sont déplacées, et *S2*, qui représente la capacité à visualiser une configuration dans laquelle des parties de la configuration ont été déplacées ou bougées. Après avoir réexaminé 69 études, dont celles de Thurstone et celles de *The United States Army Air Force (AAF)* (s.d.), French (1951) établit l'existence de trois facteurs : 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 et du besoin de sélectionner les élèves pour les collèges d'enseignement général et les collèges techniques. Cette nécessité mène au développement de

² « 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*] » (Cronbach, 1949, p. 16).

nouveaux tests et au questionnement 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*³, qu'il subdivise en un sous-facteur spatial et un sous-facteur mécanique. Le facteur spatial serait à subdiviser à nouveau pour distinguer « 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, 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 et démontre l'existence d'un continuum classant les facteurs vitesse de perception, espace et visualisation en ordre croissant de complexité. Il en conclut que les tâches d'orientation spatiale sont plus faciles à réaliser que les tâches de visualisation spatiale.

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

2.1.3 Phase III – 1961-1982

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

L'auteur signale le début cette phase par les travaux de Werdelin (cité dans Eliot, 1983, p. 6, cité dans Eliot, 1987, p. 56) sur des lycéens suédois en 1961. Eliot y trouve deux intérêts : Werdelin démontre 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 le point focal de plusieurs études. McGee (1979), quant à lui, voit dans l'étude de Werdelin la confirmation que l'habileté spatiale et la performance en mathématiques sont liées (p. 897). L'étude de Werdelin mentionne aussi les procédés de résolution que cet auteur présume être mis en œuvre par les sujets (cité dans Eliot, 1987, p. 56).

Piaget et Inhelder (1977) lient le développement des capacités spatiales à l'âge : l'enfant construit progressivement sa connaissance de l'espace dès sa naissance. Les enfants évoluent d'un espace perceptif, dans lequel la perception sensori-motrice égocentrique de leur environnement guide leur acquisition de connaissances de l'espace, vers un espace

³ *Practical* = (personne) doué de ses mains, habile de ses mains, bricoleur, bricoleuse (Kellogg, s.d.)

représentatif, dans lequel ils considèrent les rapports topologiques⁴ entre les objets. Viennent ensuite l'espace projectif⁵, dans lequel ils acquièrent la capacité à percevoir les objets et leurs relations d'un point de vue différent du leur, et l'espace euclidien⁶, dans lequel ils savent se placer ou placer un objet dans un espace défini par des coordonnées.

Une autre source de variance est investiguée grâce à l'exploration des traitements engagés dans la résolution des problèmes présentés dans les tests spatiaux (Eliot, 1983, p. 6). Selon Pilardeau (2008), les années 1970 sont caractérisées par une série d'études qui établissent des temps de réponse similaires en situations perceptives et en situations imaginatives (p. 28). Leurs auteurs en concluent une analogie des processus en situations perceptives et en situations imaginatives et, par conséquence, une « équivalence des mécanismes régulant l'imagerie et la perception visuelle » (p. 28).

2.1.4 Phase IV - 1982-présent

Nous proposons une quatrième phase de la recherche sur l'habileté spatiale, caractérisée par l'approfondissement de l'étude de la relation existant entre l'habileté spatiale et les disciplines Sciences Technologie Informatique Mathématiques (STIM). Celle-ci avait été abordée lors de la création des tests destinés au recrutement de professionnels aux EUA et à la sélection des élèves en Grande-Bretagne. Elle est désormais explorée dans ses dimensions académiques tels les choix d'orientation, la réussite et la persistance dans les études en STIM, dont les sciences de l'ingénieur.

Les études de Shea *et al.* (2001)(Shea *et al.*, 2001) et Wai *et al.* (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, dont celles mettant en œuvre la CAO (Agbanglanon, 2019; Branoff et Dobelis, 2012b; Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012). En raison de cette corrélation, plusieurs études (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) sont menées par des enseignants de disciplines STIM qui cherchent 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. Parmi ceux-ci, certains utilisent des outils de CAO (Górska, 2005; Martín-Dorta *et al.*, 2008; Onyancha *et al.*, 2009; Sorby, 1999a). Certaines recherches (Górska, 2005; Leopold *et al.*, 2001; Sorby, 2005; Veurink *et al.*, 2009) s'intéressent plus particulièrement au cas des femmes, dont la performance est traditionnellement décrite comme inférieure à celle des hommes (Albaret et

⁴ « 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).

⁵ « 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)

⁶ « 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)

Aubert, 1996; Bodner et Guay, 1997; Maeda et Yoon, 2013; McGee, 1979). Les résultats obtenus sur l'étude de l'efficacité des dispositifs de remédiation vont alimenter la recherche sur la malléabilité de l'habileté spatiale, dont la démonstration est faite dans la méta-revue d'Uttal et ses collègues (Uttal *et al.*, 2013).

Parmi les recherches investiguant la relation entre habileté spatiale et performance en STIM, et celles visant à améliorer l'habileté spatiale, certaines études poursuivent l'exploration des sources de variance entamée dans la phase III. L'apprentissage informel est questionné dans des recherches portant sur les jeux vidéo d'action (Feng *et al.*, 2007 ; Gold *et al.*, 2018), les jeux de construction (Gold *et al.*, 2018; Górska *et al.*, 1998), les puzzles (Reilly *et al.*, 2017) et le sport (Moreau *et al.*, 2012) : des liens y sont établis. De plus, la relation entre l'habileté spatiale et la prévalence manuelle a été examinée : une étude antérieure de Guay et McDaniel (1978) avait montré que les droitiers performant significativement mieux que les gauchers au PSVT:V et au MRT (p. 96). La méta-analyse de Somers *et al.* (2015), qui porte sur seize études, établit une supériorité faible mais significative des droitiers dans les tests spatiaux, et plus particulièrement le MRT (p. 41). Dans les deux études la prévalence manuelle n'est abordée qu'en termes de gauchers et droitiers.

Cette période connaît d'autre part la création de nouveaux tests visant à mesurer les compétences de manière plus fiable sous format papier-crayon (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; Onyancha *et al.*, 2009; Tsutsumi *et al.*, 1999).

2.2 Définition de l'habileté spatiale

En raison des différentes approches scientifiques décrites ci-dessus qui ont mené à la découverte des facteurs spatiaux, il n'existe pas d'accord 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). Souvent déclinée en une liste de facteurs la composant, l'habileté spatiale est rarement définie comme une entité. Lohman (1993) pense que l'habileté spatiale n'est pas « une construction mentale unitaire [*a unitary construct*] » (p. 3). Selon lui, « il y a plusieurs habiletés spatiales, en fait, chacune accentuant un aspect différent du procédé de génération, stockage, récupération et transformation d'images⁷ » (p. 3). Quelques auteurs proposent une définition unique : Linn et Peterson (1985) la décrivent comme « une habileté à représenter, transformer, générer et se souvenir d'information non linguistique symbolique [*skill in representing, transforming, generating and recalling symbolic, nonlinguistic information*] » (p. 1482), Lohman (1993) fait état d'une capacité à « générer, retenir, récupérer et transformer des images visuelles bien structurées [*generate, retain, retrieve, and transform well-structured visual images*] » (p. 3). Carroll (1993) mentionne « les habiletés des individus à fouiller le champs visuel, à appréhender les objets, les formes et les positions d'objets perçus visuellement, à former des représentations mentales de ces objets, formes et positions, et à manipuler de telles représentations « mentalement »⁸ » (p. 304). Dans les définitions de ces trois auteurs, il s'agit de créer, transformer et reconnaître des formes et des objets mentalement.

⁷ There are, in fact, several spatial abilities, each emphasizing different aspects of the process of image generation, storage, retrieval, and transformation.

⁸ 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'.

Parmi ceux identifiés par la littérature et illustrés dans le tableau 1, les facteurs 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).

Tableau 1. Synthèse des facteurs spatiaux et auteurs

Auteurs	Facteurs spatiaux										
	Visualisation spatiale	Orientation spatiale	Vitesse de perception	Clôture	Mémoire visuelle	Imagerie kinesthésique	Relations spatiales	Perception spatiale	Rotation mentale	Intégration en série	Scanning spatial
Thurstone (1950)	✓	✓	✓	✓	✓						
French (1951)	✓	✓					✓				
Michael <i>et al.</i> (1957)	✓	✓				✓	✓				
McGee (1979)	✓	✓									
Connor et Serbin (1980)	✓	✓		✓							
Linn et Petersen (1985)	✓							✓	✓		
Lohman (1988)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
Tartre (1990)	✓	✓									
Carroll (1993)	✓		✓	✓			✓				
Maier (1996)	✓	✓					✓	✓	✓		
Duroisin (2015)	✓	✓			✓				✓		

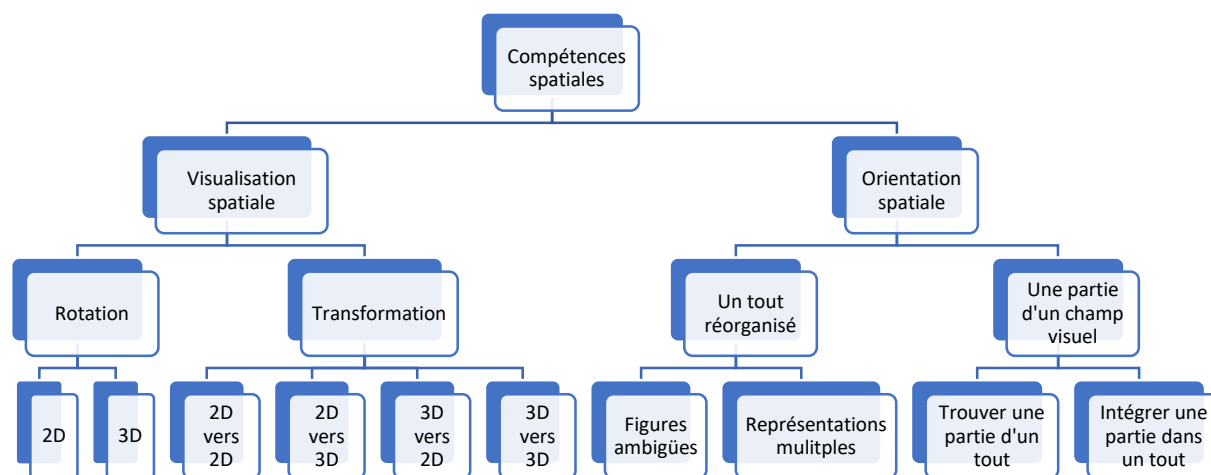
Note. Ce tableau indique les facteurs spatiaux retenus par différents auteurs dans leur définition de l'habileté spatiale. Les plus cités sont la visualisation spatiale et l'orientation spatiale.

2.2.1 La classification de Tartre (1984)

S'appuyant sur les travaux de McGee (1979) et afin de synthétiser et d'organiser les multiples processus mentaux visés par les tâches destinées à évaluer les compétences spatiales identifiées par la littérature, Tartre (1984) propose un modèle, décomposant les deux facteurs les plus cités en sous-facteurs : la visualisation spatiale comprend la rotation mentale et la transformation mentale ; l'orientation spatiale comprend un tout réorganisé et une partie d'un tout. D'après

l’auteure, ce modèle, illustré figure 1, saisit la distinction entre les deux facteurs principaux selon laquelle « la visualisation spatiale implique le mouvement d’une image mentale, alors que l’orientation spatiale implique de comprendre ou de donner du sens à une représentation visuelle⁹ » (p. 27). Eliot (1987, p. 7) établit la même distinction lorsqu’il classe 300 tests papier-crayon en deux catégories : ceux qui sont résolus par manipulation et ceux qui sont résolus par reconnaissance.

Figure 1. Classification des compétences spatiales selon 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.

2.2.2 La visualisation spatiale

La visualisation spatiale, telle que définie par McGee (1979), implique « la capacité à pivoter, manipuler et déformer mentalement des stimuli en deux et en trois dimensions [*the ability to mentally rotate, manipulate, and twist two- and three-dimensional stimulus objects*] » (p. 896). Cette compétence mobilise la manipulation mentale d’objets (Guay, 1980, p. 5; Hegarty et Waller, 2004, p. 176; Tartre, 1984, p. 7, 1990b, p. 29) 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 et Waller, 2004, p. 176).

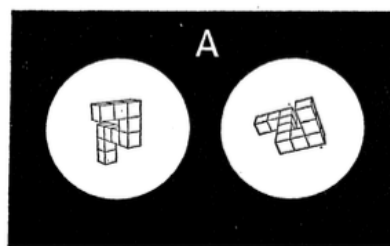
Kersh et Cook (1979, cités dans Tartre, 1990) décomposent la visualisation spatiale en deux catégories, soit la rotation mentale et la transformation mentale. Les auteurs justifient cette distinction par la portion de l’objet à transformer : elle est partielle, dans le cas de la transformation mentale,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

⁹ *Spatial visualization involves movement of a mental image, whereas spatial orientation involves comprehending or making sense of some visual representation.*

2.2.2.1 La rotation mentale

Selon Hoyek, Collet et Guillot (2010), la rotation mentale est « la capacité à faire tourner mentalement l'image d'un objet en 2 ou 3 dimensions » (p. 29). Le terme rotation mentale est mentionné pour la première fois par Shepard et Metzler (1971) à partir d'une expérience qu'ils ont menée en 1971 : ils demandent à huit sujets adultes de décider si deux dessins en perspective d'objets en trois dimensions (3D), présentés avant et après avoir subi une rotation selon une symétrie centrale et illustrés dans la figure 2, sont similaires. Les chercheurs constatent une augmentation linéaire du temps de réponse en fonction de l'augmentation de la différence angulaire séparant les figures, lorsque les figures sont identiques. Les auteurs en concluent que les sujets tournent mentalement les objets pour discriminer les formes.

Figure 2. Représentation d'une tâche de rotation mentale



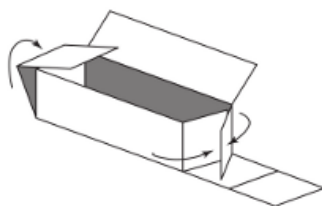
Note. Une paire de formes issue de l'expérience de Shepard et Metzler (1971). Extrait de « Mental Rotation of Three-Dimensional Objects » de R. N. Shepard et J. Metzler, 1971, *Science*, 171, p. 702.

2.2.2.2 La transformation mentale

Cette capacité implique « différentes opérations sur différentes parties d'une image mentale [*different operations on separate parts of the mental image*] » (Kersh et Cook, 1979, cités dans Tartre, 1990, p. 31). Tartre (1984) distingue quatre types de transformation (p. 10-14) :

- la transformation d'une image en deux dimensions (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 l'exercice de pliage mental d'Adam *et al.* (2013), illustré 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.

Figure 3. Représentation d'une tâche de transformation mentale



Note. Représentation du pliage d'un patron pour former un solide. Extrait de « Boîte à cubes » de E. Adam, J.F. Jamart, S. Petitjean, S. Tummarello et M. Bourbion, 2013, Dans F. Clerc (dir.), *La troisième dimension. Voir et concevoir l'espace*, fiche Boîte à cubes.

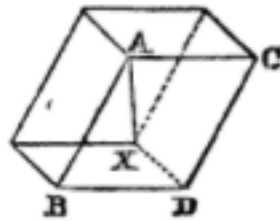
2.2.3 L'orientation spatiale

L'orientation spatiale peut être définie comme « l'aptitude d'une personne à ne pas être désorientée par les différentes orientations selon lesquelles un motif peut être présenté [*a person's ability to remain unconfused by the varying orientations in which a pattern may be presented*] » (Thurstone, 1950, p. 518). Cette compétence nécessite une transformation égocentrique du cadre de référence : il s'agit pour le sujet de modifier son cadre de référence par rapport à l'objet visualisé et l'environnement dans lequel il se trouve (Hegarty et Waller, 2004, p. 176), en d'autres mots, de changer de point de vue pour reconnaître tout ou partie d'un objet. L'orientation spatiale exige d'un sujet qu'il comprenne une représentation visuelle ou le changement qui a été opéré entre deux représentations du même objet (Tartre, 1990b, p. 33). L'auteure identifie deux catégories de tâches : celles dans lesquelles le sujet doit comprendre la réorganisation d'un tout et celles dans lesquelles il doit reconnaître une partie d'un tout. Cette distinction est partagée par Just et Carpenter (1984) qui mentionnent des procédés de changement de point de vue et des descriptions dépourvues d'orientation (p. 6-7).

2.2.3.1 Un tout réorganisé

Les tâches faisant appel à cette capacité impliquent « la réorganisation et la compréhension d'une représentation visuelle complète ou d'un changement perceptif d'une représentation à une autre [*the reorganization and comprehension of an entire pictorial representation or a perceptual change from one representation to another*] » (Tartre, 1990b, p. 34). Hegarty et Waller (2004) parlent de capacité à adopter un point de vue (p. 176). Tartre distingue deux types de tâches : celles qui impliquent la compréhension des figures ambiguës, tel le cube de Necker (Necker, 1832) illustré dans la figure 4, et celles qui présentent des représentations multiples, comme lorsque l'on présente un objet selon différents points de vue à un sujet, qui doit pouvoir toutes les associer à l'objet (p. 34). Just et Carpenter (1984) précisent que dans ce cas, la position de l'objet et celle de l'observateur sont codées dans un même système de coordonnées cognitif, qui inclut à la fois l'observateur et l'objet, et dont l'origine correspond à la position de l'objet (p. 7).

Figure 4. Le cube de Necker



Note. Extrait de « LXI. Observations on some remarkable optical phænomena seen in Switzerland; and on an optical phænomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid » de L. A. Necker, 1832, *Philosophical Magazine, Third series*, vol. 1, 5, p. 336.

2.2.3.2 Une partie d'un tout

Cette catégorie concerne les tâches dans lesquelles est impliquée la relation d'un élément avec le tout dont il est issu, qu'il soit présenté visuellement ou qu'il doive être imaginé. Tartre (1990b) distingue deux types de tâches (p. 37). Celles dans lesquelles le sujet doit faire correspondre un élément à un tout, telle la représentation partielle d'une image dont la totalité peut être reconstituée grâce aux lois de la *Gestalttheorie* (Wertheimer, 1923) : les objets sont perçus comme des ensembles cohérents, composés de constituants en interaction les uns avec les autres. Un triangle semble apparaître dans le motif de Kanisza (1955), illustré dans la figure 5, alors qu'il n'est pas dessiné. Cette perception résulte d'une « pulsion perceptuelle qui tend à unifier tout agrégat de stimuli visuels dans une totalité qui se rapproche le plus possible des structures particulières que sont les « gestalt » » (Saint-Martin, 1992, p. 74).

Figure 5. Le triangle de Kanisza

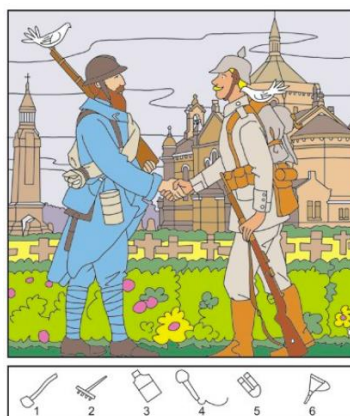


Note. Extrait de « Quasi-Perceptual Margins in Homogeneously Stimulated Fields » de G. Kanisza, [Margini quasi-percettivi in campi con stimolazoino omogenea, *Rivista di Psicologia*, vol. 49, 1, 7-30] (Ouvrage original publié en 1955) (W. Gerbino, trad.), 1984, dans S. Petry et G. E. Meyer (dir.), *The Perception of Illusory Contours*, p. 44.

Le second type de tâche concerne celles dans lesquelles un sujet doit dissocier un élément de son contexte comme dans le jeu de casse-tête illustré dans la figure 6 (La Voix du Nord, 2012). Il sollicite l'indépendance à l'égard du champ (Witkin *et al.*, 1962, p. 2), autrement nommée organisation perceptive chez Thurstone (1950, p. 520) et flexibilité perspective chez French *et al.* (1963, p. 19), et implique de distinguer une figure simple d'une figure plus complexe dans laquelle elle est intriquée (Thurstone et Jeffrey, 1965, p. 1). Pour ce faire, le sujet doit garder à l'esprit la première figure (French *et al.*, 1963, p. 19; Thurstone, 1950, p. 520). Ces tâches sont en contradiction avec les lois de la *Gestalttheorie*, qui résistent « à la séparation, à la rupture et à l'interruption [*Trennung, Zerreiung, Unterbrechung*] » (Wertheimer, 1923, p. 348). « Si on

ne retient perceptuellement, par une fixation fovéale, ou qu'on isole « mentalement » une seule ou quelques-unes des parties d'une gestalt, on a détruit celle-ci dans sa spécificité d'être un champ de forces en interaction. De fait, on a substitué une nouvelle donnée à celle qui était d'abord proposée à la perception » (Saint-Martin, 1992, p. 25).

Figure 6. Tâche dans laquelle il faut dissocier un élément intriqué dans un motif complexe



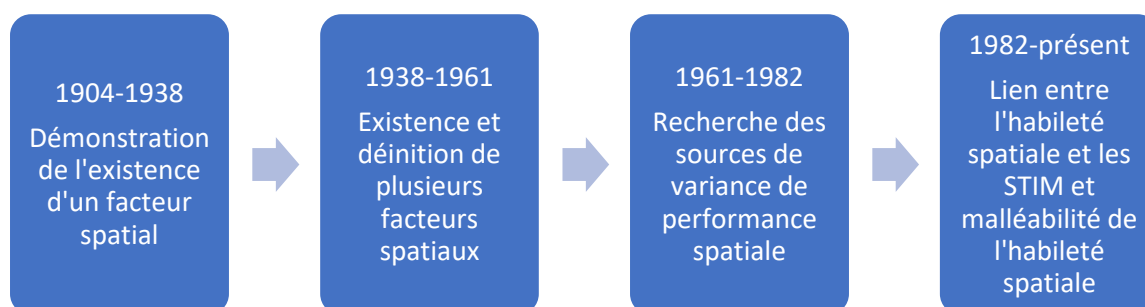
Note. Les formes numérotées de 1 à 6 sont intriquées dans le dessin dont il faut les dissocier. Extrait de l'énigme 34 de la rubrique Trucmuche, *La Voix du Nord*, 2012, 17 octobre.

2.3 Synthèse

La recherche sur l'habileté spatiale est profondément liée à la recherche visant à définir l'intelligence. Les approches psychométrique, développementaliste et expérimentale ont été utilisées pour tenter de la définir (Eliot, 1987, p. 13).

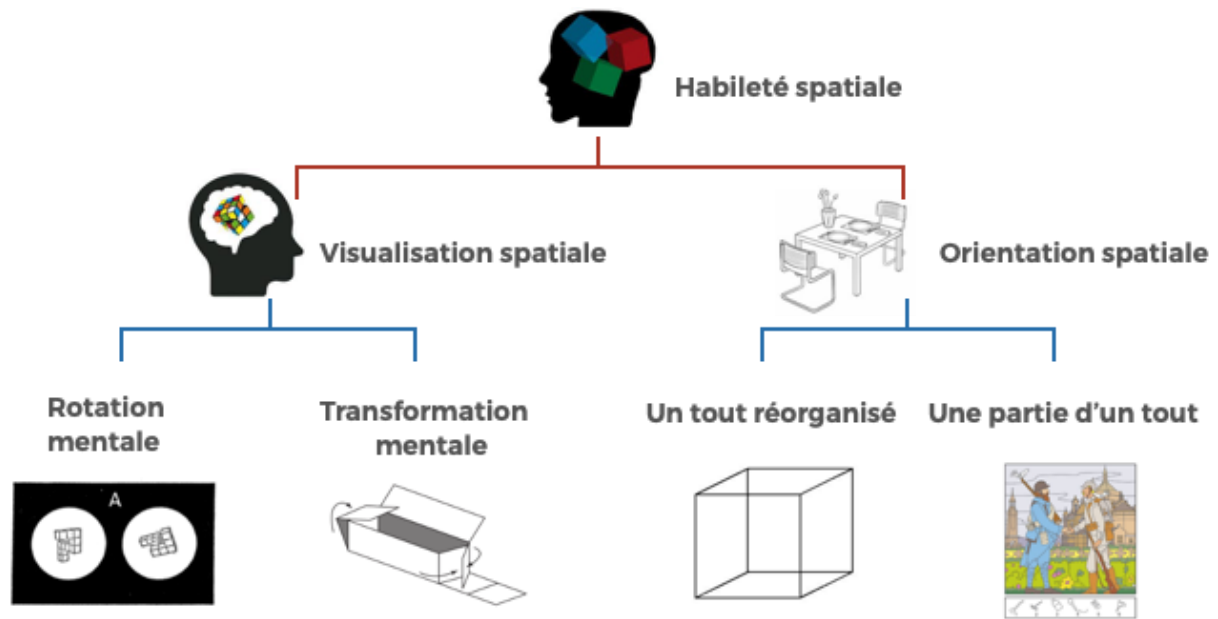
Cette recherche peut être décrite en quatre phases illustrées dans la figure 7.

Figure 7. Phases de l'histoire de la recherche sur l'habileté spatiale



En raison des différentes approches adoptées pour la caractériser, l'habileté spatiale est sujette à différentes définitions. Le modèle de Tartre (1984), illustré dans la figure 8, classe les facteurs qui la composent en s'appuyant sur les deux facteurs les plus fréquemment cités dans les études visant à définir l'habileté spatiale. Cette classification oppose les facteurs de manipulation mentale aux facteurs de compréhension de représentations visuelles.

Figure 8. Classification des facteurs spatiaux adaptée du modèle de Tartre (1984)



Note. Illustration des habiletés spatiales organisées selon la classification de Tartre (1984).

Illustration de l'habileté spatiale trouvée sur <https://humanboundary.com/spatial-reasoning-test-helping-the-employers-to-hire-the-right-candidate/>

Illustration de la visualisation spatiale trouvée sur <https://www.educationworld.in/developing-childrens-spatial-intelligence/>

Illustration de l'orientation spatiale extraite du « *Spatial Reasoning Instrument* », de A. Ramful, T. Lowrie et T. Logan, 2016, question 2.

Illustration de la rotation mentale extraite de « *Mental Rotation of Three-Dimensional Objects* » de R. N. Shepard et J. Metzler, 1971, *Science*, 171, p. 702.

Illustration de la transformation mentale extraite de « *Boîte à cubes* » de E. Adam, J.F. Jamart, S. Petitjean, S. Tummarello et M. Bourbion, 2013, Dans F. Clerc (dir.), *La troisième dimension. Voir et concevoir l'espace*, fiche Boîte à cubes.

Illustration d'un tout réorganisé extraite de « *The Necker Cube – An Alternative Measure of Direct Attention* », J. Hurlbut, 2011, Dans B. Sullivan (dir.) *Proceedings of the National Conference on Undergraduate Research*, p. 1223.

Illustration d'une partie d'un tout extraite de l'énigme 34 de la rubrique Trucmuche, *La Voix du Nord*, 2012, 17 octobre.

Chapitre 3. Mesurer l'habileté spatiale

Il existe de nombreux tests papier visant à mesurer l'habileté spatiale : Eliot et Macfarlane Smith (Eliot et Macfarlane Smith, 1983) en présentent 392 dans leur *International Directory of Spatial Tests*. De nouveaux tests ont été produits depuis la publication de cet ouvrage.

Dans son travail de thèse, Kelly (2013) établit une liste de vingt-quatre tests à partir de sa revue de littérature portant sur l'enseignement du dessin industriel et la mesure de l'habileté spatiale et du catalogué d'ETS (p. 6). L'auteur interroge les membres de l'*Engineering Design Graphics Division*¹⁰ sur leurs préférences parmi cette liste (p. 6). Ceux-ci se prononcent pour le *Mental Rotation Test* (Vandenberg et Kuse, 1978), le *Mental Cutting Test* (College Entrance Examination Board, 1939), et le *Purdue Spatial Visualization Test : Visualization of Rotations* (Guay, 1976a). Cette sélection corrobore l'analyse comparative internationale réalisée par Ault et John (2010, p. 13)

Nous allons présenter dans ce chapitre une liste de tests, organisée selon les compétences spatiales composant le modèle de Tartre (1984).

3.1 Tests mesurant la visualisation spatiale

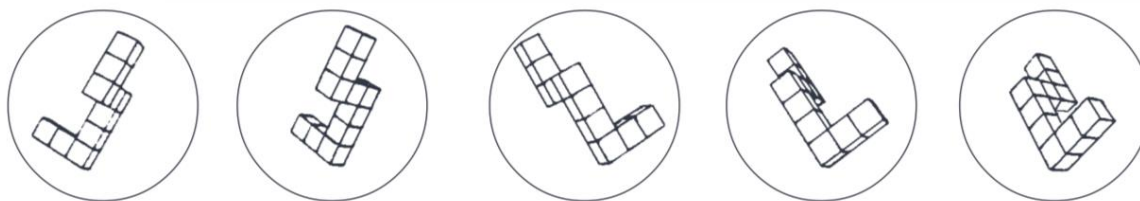
3.1.1 Tests mesurant la rotation mentale

Le *Mental Rotation Test* (MRT) (Vandenberg et Kuse, 1978) est l'un des trois tests les plus utilisés pour mesurer l'habileté spatiale (Ault et John, 2010, p. 13; Kelly Jr, 2013, p. 6). À partir des travaux de Shepard et Metzler (1971), Vandenberg et Kuse (1978) créent un test papier à choix multiple comportant vingt questions. Pour chaque problème, une figure de référence est donnée et le sujet doit trouver les deux figures qui lui correspondent parmi quatre réponses possibles. Les instructions n'indiquent pas de procédure à appliquer pour répondre aux questions. Les objets sont présentés selon différentes orientations, comme ayant subi des rotations effectuées selon une symétrie centrale, comme illustré dans la figure 14. Chaque stimulus correspond à une vue axonométrique (Yue, 2006, Introduction, para. 7), c'est-à-dire des projections graphiques orthogonales en 3D dans lesquelles les parallélismes et les distances sont conservées (Bailly, 1978, cité dans l'Office québécois de la langue française, 2012). Pour la moitié de l'épreuve, les distracteurs sont des images en miroir pivotées du stimulus, et pour l'autre moitié, des images pivotées d'une ou de deux réponses proposées. Ses auteurs précisent que la correction s'effectue en allouant un point pour deux réponses correctes et aucun point pour une réponse incorrecte ou partielle (p. 599). Ce barème vise à empêcher les sujets de deviner les réponses. Le test est administré en deux parties dissociées par une pause dans une de leurs expérimentations (p. 601). 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)¹¹. Albaret et Aubert (1996) proposent une traduction française du test à la fin de leur article et ajoutent le titre Test de rotation mentale. Un exemple de question est présenté dans la figure 9.

¹⁰ 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/>).

¹¹ En Annexe 2.

Figure 9. Exemple de question issue du MRT (Vandenberg et Kuse, 1978), version d'Albaret et Aubert (1996)

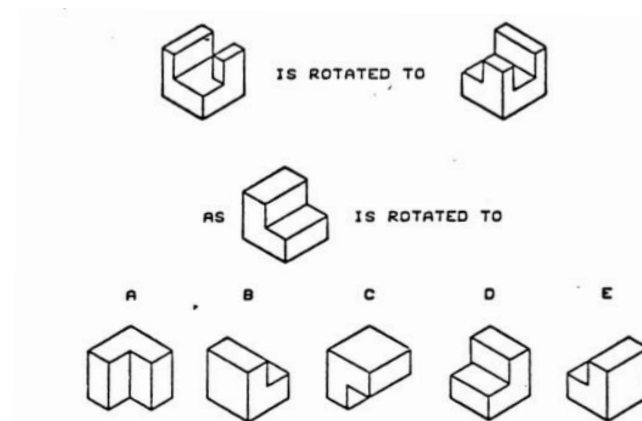


Note. Cet exemple de question issue du MRT présente le stimulus à gauche et les quatre alternatives à droite. Parmi celles-ci, deux représentent la même figure que le stimulus. Extrait de « Étalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg », de J. M. Albaret et E. Aubert, 1996, *EVOLUTIONS psychomotrices*, p. 273.

Le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations* (PSVT:R) (Guay, 1976a) figure aussi parmi les trois tests les plus utilisés pour mesurer l'habileté spatiale (Ault et John, 2010; Kelly Jr, 2013). Yue (2006) explique sa popularité par la simplicité de son format : les représentations des objets sont des dessins isométriques, i.e. des dessins qui représentent de la même manière la face avant, la face du dessus et une face de côté (p. 3). Cette représentation utilise un facteur de réduction identique pour toutes les mesures, ce qui ne rend pas compte de la réduction apparente de taille avec l'éloignement. Le PSVT:R comporte trente questions de difficulté croissante présentant la vue isométrique d'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, pour l'appliquer à un deuxième objet et trouver la bonne réponse parmi cinq proposées, comme illustré dans la figure 10. Les rotations sont réalisées selon une symétrie axiale, dans le plan ou perpendiculaire au plan, selon des multiples de 90°. Le test comporte trente questions et le temps de réponse est limité à vingt minutes (Guay, 1980, p. 9). Les objets présentent des surfaces planes, inclinées ou non, obliques et cylindriques. Guay précise que le test a été conçu comme instrument de recherche dans le but de mesurer la visualisation spatiale (p. 9). 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 et Guay (1997) déclarent que le PSVT:R nécessite « des opérations mentales sur les représentations mentales d'un objet qui sont plus comparables aux manipulations de l'objet en trois dimensions représenté que celles des dessins en deux dimensions qui sont présentés¹² » (p. 8). Selon la définition de la visualisation spatiale de McGee (1979), qui associe cette compétence notamment à la manipulation mentale d'objets (p. 892), le processus cognitif mesuré par ce test peut être associé à la visualisation spatiale, et selon la distinction de Kersh et Cook (1979, cités dans Tartre, 1984, p. 7), qui associent cette capacité à la transformation de la totalité d'un objet, il peut être associé à la rotation mentale. Maeda, Yoon, Kim-Kang et Imbrie (2013) affirment que ce test mesure la rotation mentale en 3D (p. 765).

¹² *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.*

Figure 10. Exemple de question issue du PSVT:R



Note. Cet exemple de question issue du PSVT:R présente la rotation de référence en haut, le stimulus au milieu et les quatre alternatives en bas. Parmi celles-ci, une représente le stimulus après qu'il a subi la même rotation que celle de référence. Extrait de « *Purdue Spatial Visualization Test: Rotations* », de R. B. Guay, 1976, Purdue Research Foundation: West Lafayette, section *Directions*.

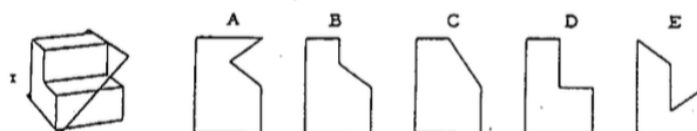
Le *Revised Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations* (R PSVT:R) (Yoon, 2011) est le fruit du travail de révision du PSVT:R par Yoon, avec la permission de Guay (Maeda *et al.*, 2013, p. 766). Cette mise à jour avait pour but d'éliminer les erreurs de représentation dues au recours au dessin isométrique repérés dans les travaux de Yue (2006, section 6, para. 1, 2008, p. 31) (Maeda *et al.*, 2013, p. 766). Elle est accompagnée d'une révision de la mise en page pour ne présenter qu'une question par page et d'une unification de la taille des objets présentés. Yoon et Mann (2017) le définissent comme un *power test* (p. 316), c'est-à-dire un type de test destiné à calculer le niveau de maîtrise sans ou avec peu de pression due au temps (American Psychological Association, 2022b). Le temps de passation est illimité afin de mesurer le réel niveau d'habileté spatiale des répondants (Yoon et Mann, 2017, p. 316).

3.1.2 Test mesurant la transformation spatiale

Le troisième test le plus fréquemment cité (Ault et John, 2010; Kelly Jr, 2013) est le *Special Aptitude test in Spatial Relations* (College Entrance Examination Board, 1939), plus communément nommé *Mental Cutting Test* (MCT). Chaque question présente un solide en 3D et un plan de coupe le traversant. Le sujet doit choisir la réponse présentant la coupe résultante, suivant la normale au plan de coupe, parmi cinq choix proposés, comme illustré dans la figure 11. Cette opération mène à modifier 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 « à concevoir et manipuler des images mentales en trois dimensions [*in making and manipulating three-dimensional mental images*] » (Tsutsumi *et al.*, 1999, p. 111). Cette manipulation s'applique à une partie de l'objet ce qui correspond à la définition de la transformation mentale de Kersh et Cook (cités par Tartre, 1984, p. 10). Le test, limité à vingt minutes, comporte vingt-cinq questions réparties en deux catégories : une partie des questions sont résolues 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, p. 111). Dans son étude portant sur une centaine d'étudiants en cours d'introduction au Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) et à la Conception Assisté par Ordinateur (CAO), Sorby (1999b, p. 4.465.5) compare les résultats obtenus par les étudiants au PSVT:R, au MCT et au *Differential Aptitude Tests, Forms S and T* (Bennett *et al.*, 1973) à leur capacité à travailler

efficacement dans un environnement de modélisation en 3D, mesurée au travers des évaluations intégrées au cours. L'auteure en conclut que le MCT est le test de mesure le plus fiable, parmi les trois utilisés, pour prédire la capacité à apprendre et à utiliser un modèleur volumique (p. 4.465.5). Ce résultat est confirmé dans les travaux de Steinhauer (2012). Steinhauer explique cette corrélation par le fait que l'utilisation efficace des modèles 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 (p. 47).

Figure 11. Exemple de question issue du MCT



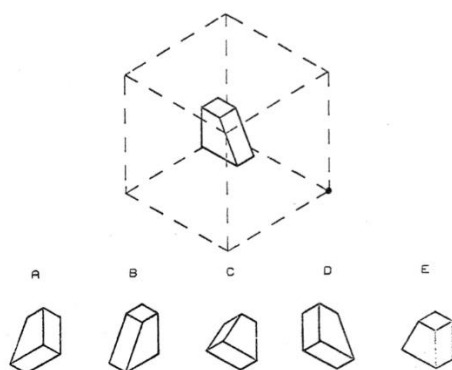
Note. Cet exemple de question issue du MCT présente stimulus à gauche et les cinq alternatives à droite. Parmi celles-ci, une représente la section résultant de la coupe représentée sur le stimulus. Extrait de « *Special Aptitude Test in Spatial Relations* », de College Entrance Examination Board, 1939, p. 1.

3.2 Tests mesurant l'orientation spatiale

3.2.1 Tests mesurant Un tout réorganisé

Le *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* (PSVT:V) (Guay, 1976b) fait partie, comme le PSVT:R, de la batterie de tests conçus par Guay pour mesurer l'habileté spatiale (Guay, 1980, p. 11). De même que le PSVT:R et le R PSVT:R, il est composé de vues isométriques d'objets présentant des surfaces planes, inclinées ou non, obliques et cylindriques. Il compte trente questions à choix multiple visant à évaluer la capacité à imaginer ce à quoi ressemble un objet en 3D à partir de différents points de vue. Pour ce faire, les questions présentent un objet que l'on doit imaginer flotter au milieu d'un cube de verre, comme illustré dans la figure 12. Un point noir indique le sommet à partir duquel il faut s'imaginer observer l'objet, de manière à choisir la représentation, parmi cinq propositions, qui y correspond. Le test est décrit par Guay et McDaniel (1978) comme un test suscitant un traitement qui mobilise une figure globale et qui met en œuvre des tâches d'orientation (p. 98).

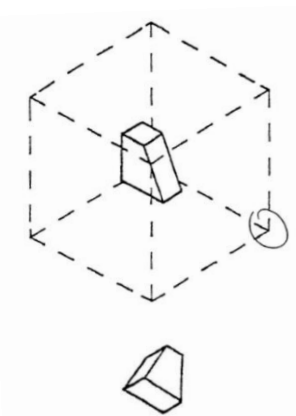
Figure 12. Exemple de question issue du PSVT:V



Note. Cet exemple de question issue du PSVT:V présente le stimulus en haut et les quatre alternatives en bas. Parmi celles-ci, une représente le stimulus vu à partir du point noir situé sur l'angle droit en bas. Extrait de « *Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Views* », de R. B. Guay, 1976, Purdue Research Foundation: West Lafayette, section *Directions*.

Il existe une autre version du test, intitulée *Visualization of Viewpoints* (Guay et McDaniel, 1976), composée des 24 premières questions du PSVT:V pour lesquelles un objet flottant au milieu d'un cube de verre est présenté accompagné d'une représentation de cet objet observé à partir d'un des huit coins du cube, comme illustré dans la figure 13. Le répondant doit encercler le coin à partir duquel l'objet proposé est observé. Le temps est limité à huit minutes (section *Instruction*).

Figure 13. Exemple de question issue du *Visualization of Viewpoints*

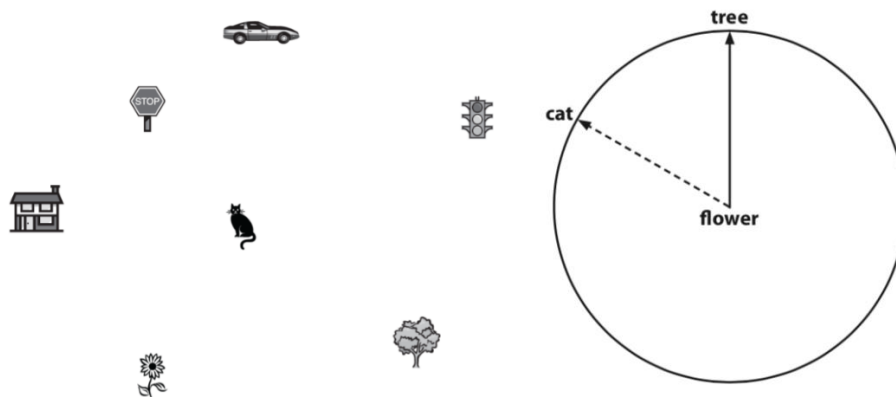


Note. Cet exemple de question issue du PSVT:V présente le stimulus en haut et une autre représentation du stimulus en bas. On indique la réponse en encerclant l'angle correspondant à la vue du bas. Extrait de « *Visualization of Viewpoints* », de R. B. Guay et E. D. McDaniel, 1976, Purdue Research Foundation: West Lafayette, section *Instruction*.

Plus récemment, Hegarty, Kozhevnikov et Waller (Hegarty et Waller, 2004; Kozhevnikov et Hegarty, 2001) ont développé le *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* (PTSOT). Le test vise à évaluer la capacité à imaginer différentes perspectives et orientations dans l'espace (Hegarty *et al.*, 2008, section Spatial Orientation Test, para. 1). Il est composé de douze questions qui doivent être traitées dans un délai de cinq minutes. Chaque question présente un ensemble d'objets organisés en cercle autour d'un objet central, comme illustré dans la figure 14. Les instructions indiquent au sujet à la place de quel objet il doit s'imaginer se trouver, à

quel second objet il doit s’imaginer faire face, et de déterminer dans quelle direction se trouve un troisième objet. Cette direction est à reporter sous la forme d’une flèche sur un cercle, à partir du centre.

Figure 14. Exemple de question issue du PTSOT

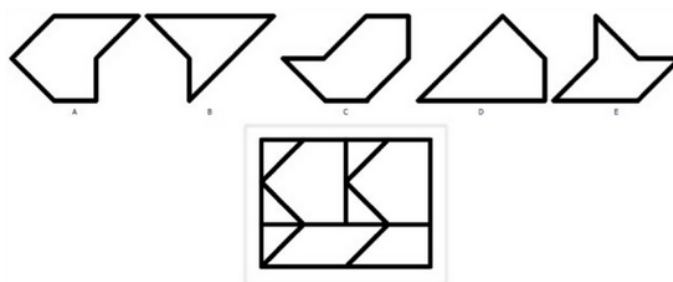


Note. Cet exemple de question issue du PTSOT présente le stimulus à gauche et la réponse à droite. On indique la réponse en dessinant sur le cercle la direction dans laquelle on voit le chat si on est placé au niveau de la fleur et que l’on fait face à l’arbre. Extrait de « *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* », de M. Hergarty, M. Kozhevnikov et D. Waller, 2008, University of California, section *Example*.

3.2.2 Tests mesurant Une partie d’un tout

Le *Hidden Figures Test* (HFT) fait partie d’une batterie de 72 tests visant à évaluer 23 facteurs (Ekstrom *et al.*, 1976, p. 1). Il est décrit comme un outil mesurant la flexibilité perceptive (p. 4). Il présente des figures issues des travaux de Gottschaldt (1926) sur l’influence des expériences sur la perception des figures (Ekstrom *et al.*, 1976, p. 20). Le test est composé de deux parties de douze minutes (Ekstrom *et al.*, 1976, p. 21). Il présente cinq stimuli visuels en 2D et trente-deux motifs en 2D dans lesquels l’un des cinq motifs est intriqué, comme illustré dans la figure 15. La taille et l’orientation des stimuli sont conservées lorsqu’ils sont intriqués dans les motifs. Le répondant doit indiquer pour chaque question quel stimulus est caché dans le motif. Il est actuellement commercialisé par *Educational Testing Service*.

Figure 15. Exemple de question issue du HFT



Note. Cet exemple de question issue du HFT présente le stimulus en bas et les cinq alternatives en haut. Parmi celles-ci, une se trouve intriquée dans le stimulus. Extrait de « Hidden Figures Test », de R. B. Ekstrom, J. W. French, H. H. Harlab et D. Diran, 1976, *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests*, p. 21. Copyright 1976 de Educational Testing Service. Reproduit avec autorisation.

Le *Closure Flexibility Test (Concealed Figures) Form A (CFT)* (Thurstone et Jeffrey, 1965) utilise aussi des figures de Gottschaldt (p. 8) et vise à mesurer la flexibilité perceptive (p. 1). Il présente 49 questions pour lesquelles le répondant doit indiquer si un stimulus visuel est présent dans quatre motifs complexes (Thurstone et Jeffrey, 1956, p. 1), comme illustré dans la figure 16. Certaines formes sont présentées en perspective linéaire, i.e. qui ne conserve pas les parallélismes et les distances, et d'autres en perspective axonométrique. Certaines questions acceptent plusieurs réponses. L'épreuve est limitée à dix minutes et les instructions précisent qu'il n'est pas attendu que le test soit terminé dans le temps imparti. Comme pour le HFT, la taille et l'orientation des stimuli est conservée lorsqu'ils sont intriqués dans les motifs complexes) (Thurstone et Jeffrey, 1956, p. 1). Les réponses erronées bénéficient de points négatifs, pour remédier aux bonnes réponses obtenues en devinant (p. 3).

Figure 16. Exemple de question issue du CFT (Thurstone et Jeffrey, 1956)



Note. Cet exemple de question issue du CFT présente le stimulus à gauche et les quatre alternatives à droite. Parmi celles-ci, deux contiennent le stimulus. Extrait de de « *Closure Flexibility (Concealed Figures) Test - Form A* », de L. L. Thurstone et T. E. Jeffrey, 1956, p. 1.

3.3 Normes d'administration

La majorité de ces tests sont considérés standardisés, c'est-à-dire que « la procédure et le contenu du test ont été tellement définis que des répondants ayant passé l'épreuve en différents lieux et à différents moments peuvent être comparés¹³ » (Cronbach, 1949, p. 16). Cependant, selon Olson et Sabers (2008), la standardisation des tests, i.e. « l'uniformité de la démarche d'administration et de correction des réponses », (Le Corff *et al.*, 2017, para. 6), telle que définie par Cronbach, ne peut jamais être implémentée (p. 423) : les conditions d'administration ne sont pas toujours indiquées et les conditions d'examen peuvent varier lors de la passation des tests (Lohman *et al.*, 1987, p. 258; Olson et Sabers, 2008, p. 424). En effet, certaines études ou

¹³ *The test procedure and content have been so fixed that subjects at different places and times can be compared.*

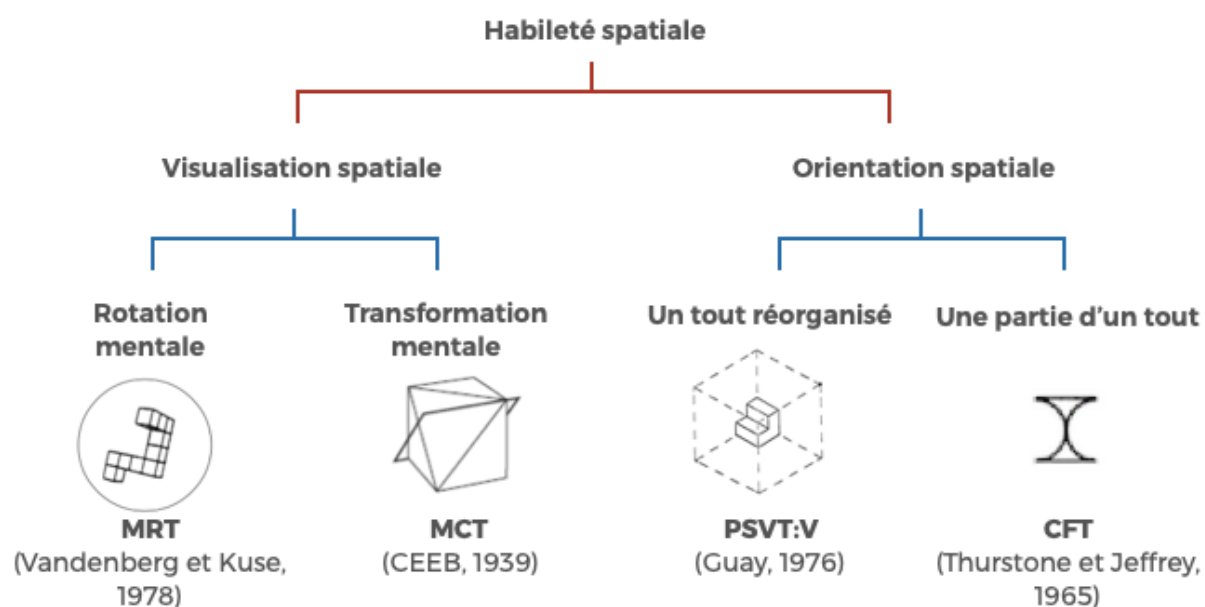
versions des tests proposent un nombre de questions (Peters *et al.*, 1995) ou des barèmes différents (Bölcskei *et al.*, 2013) des versions originales, des versions informatisées des tests conçus sous format papier (Branoff et Dobelis, 2012; Kelly Jr, 2013; Onyancha *et al.*, 2009; Tsutsumi *et al.*, 1999), ou encore des temps de réponse différents (Maeda et Yoon, 2013, p. 87).

3.4 Synthèse du chapitre

L'habileté spatiale est mesurable grâce à des tests psychométriques, dont la majorité sont des tests papier-crayon, faciles à administrer. Les tests les plus fréquemment utilisés dans les études sur l'habileté spatiale visent à mesurer la visualisation spatiale.

Plusieurs tests peuvent être utilisés pour mesurer les facteurs spatiaux définis dans le modèle de Tartre (1984). La figure 17 illustre quatre d'entre eux.

Figure 17. Exemples de tests papier-crayon visant à mesurer les facteurs du modèle de Tartre (1984)



Note. Cette figure illustre les quatre facteurs spatiaux de la classification de Tartre (1984) à l'aide de stimuli extraits de quatre tests visant à les mesurer.

Chapitre 4. Apprentissage de la modélisation 3D à l'aide de modeleurs volumiques

Parmi les tâches liées aux habiletés spatiales, on note les activités de modélisation volumique (Agbanglanon, 2019; Branoff et Dobelis, 2012b; Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012). Ce chapitre décrit l'apparition et l'évolution de la modélisation volumique, le fonctionnement des modeleurs et les connaissances déterminées nécessaires à leur utilisation par les enseignants de modélisation.

4.1 La conception assistée par ordinateur : un outil du monde professionnel

Dans le monde industriel, la conception de produits vise à fabriquer des objets en grand nombre, dans des délais courts, avec des coûts limités (Géronimi *et al.*, 2005, p. 118). De nos jours, la conception d'objets s'appuie sur des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) (Ault et Fraser, 2012, p. 26; Bertoline *et al.*, 2009, p. 642; Brown, 2009, p. 54; Hamon, 2009, p. 45; Laisney et Brandt-Pomares, 2015, p. 109; Poitou, 1984, p. 468). Ceux-ci aident les concepteurs à créer des représentations externes fiables d'objets complexes et à réduire les coûts de conception, notamment en permettant une facilité de modification et en garantissant la justesse des calculs liés à la géométrie (Audy, 1990, p. H6570-9; Brown, 2009, p. 53; Gillet, 1994, p. T7300-4; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-70; Maculet et Daniel, 2004, p. 627).

Le processus de conception permet le passage d'un objet imaginé à un objet réel (Geronimi *et al.*, 2005, p. 115; Maculet et Daniel, 2004, p. 621). Dans le domaine de la conception technique, ce processus peut être découpé en trois étapes : la recherche de solutions, ou idéation, durant laquelle plusieurs idées sont générées et proposées ; l'affinage, durant lequel une ou plusieurs solutions sont développées pour n'en retenir qu'une ; et la mise en œuvre du projet, ou industrialisation (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 32; Gillet, 1994, p. T7300-3). Au cours de ces étapes, de nombreuses représentations, dont les modèles volumiques, sont générées pour représenter les idées, en vérifier la faisabilité ou les communiquer (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 6; Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 642; Lieu et Sorby, 2009, p. 1-30; Wiebe, 1999, p. 18).

Cette traduction visuelle d'une idée peut prendre la forme d'un dessin ou d'une maquette, représentations coûteuses en temps et en compétences (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 58; Gillet, 1994, p. 5). Ces idées peuvent aussi être rapidement modélisées grâce aux modeleurs volumiques qui, au travers du dialogue homme-machine, assistent les calculs, donnent à voir, en temps réel et à partir de plusieurs points de vue, le résultat des choix du concepteur, conservent une trace des opérations réalisées, et permettent de modifier rapidement un objet (Gillet, 1994, p. T7300-4; Sonntag, 2007, p. 63).

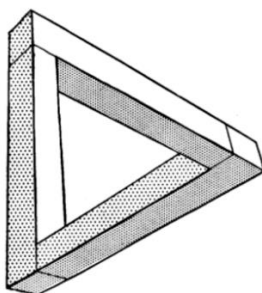
4.2 La modélisation volumique

4.2.1 Historique de la CAO

Depuis leur apparition, les outils de CAO ont évolué avec l'augmentation de la puissance de calcul et de capacité de stockage de données des ordinateurs (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 403; Lieu et Sorby, 2009, p. 1-24).

Les premiers systèmes de CAO sont développés dans les années 1960 (Brown, 2009, p. 52; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-3). Ils sont en deux dimensions et produisent des versions électroniques de dessins dans un plan cartésien (x, y), avec un positionnement figé des éléments sur les axes x et y (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 400; Brown, 2009, p. 53; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-3). Ils permettent notamment de créer différentes vues d'un objet, e.g. de face, de côté, de dessus. Ces projections ne permettent pas la visualisation d'objets en 3D, qui doit alors être réalisée mentalement par l'utilisateur. Elles peuvent représenter des objets impossibles (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-4), tel le triangle de Penrose (Penrose et Penrose, 1958), illustré dans la figure 18.

Figure 18. Le triangle de Penrose

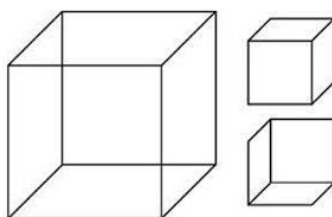


Note. Ce triangle ne peut exister que lorsqu'il est dessiné. Il est en réalité constitué de trois poutres. Extrait de "Impossible objects: a special type of visual illusion" de L. S Penrose et R. Penrose, 1958, *British Journal of Psychology*, p. 31.

Les systèmes CAO 2D évoluent vers les systèmes de modélisation filaire 2,5D¹⁴ au début des années 1980 (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-4). Comme les logiciels de CAO 2D, ils permettent d'intégrer des entités géométriques tels des lignes, des cercles, des arcs, mais ces entités géométriques sont maintenant définies par des coordonnées sur les axes x, y et z. Parce que les surfaces ne sont pas représentées comme étant pleines, l'utilisateur doit utiliser les bords et les sommets pour interpréter le volume. Certaines figures peuvent porter à confusion (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 402; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-5) comme dans le cas du cube de Necker (1832), illustré selon ses deux orientations possibles par Hurlbut (2011) dans la figure 19.

¹⁴ « L'impossibilité de définir de vraies courbes et surfaces quelconques en trois dimensions explique l'appellation 2,5D et non 3D par opposition aux systèmes de formes complexes » (Audy, 1990, p. 6)

Figure 19. Le cube de Necker et les deux orientations qui peuvent en être interprétées

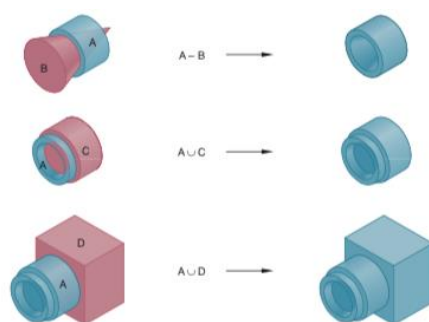


Note. Le cube de Necker est une figure ambiguë qui peut être vue de dessus ou de dessous. Extrait de « The Necker Cube – An Alternative Measure of Direct Attention » de J. Hurlbut, 2011, dans B. Sullivan (dir.), *Proceedings of the National Conference on Undergraduate Research*, p. 1223.

Les modèles filaires évoluent vers les modèles surfaciques 3D qui affichent les surfaces ainsi que les bords d'un objet (Audy, 1990, p. H6570-6; Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 403; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-7). Les surfaces peuvent être créées à partir de balayages, comme la révolution, et des rognages. Un modèle surfacique est un ensemble de surfaces individuelles (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-7). Il est important de porter attention à la continuité entre les surfaces pour en garantir les connections en cas de modification (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 406).

Les modelleurs de solides apparaissent dans les années 1980 (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-8). À la notion de surface, ils ajoutent la distinction entre l'intérieur et l'extérieur d'un objet, ainsi que l'épaisseur (Audy, 1990, p. H6570-6; Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 408; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-8). Ils s'appuient notamment sur la technique de la géométrie de construction de solides qui proposent une collection de solides simples appelés primitives, tels le pavé droit, la sphère ou le cylindre. Ces primitives peuvent être agencées par trois opérations booléennes : union, soustraction et intersection. Parce que le nombre de primitives est limité, les topologies possibles qui résultent de leur agencement le sont aussi. De plus, ces systèmes requièrent que les utilisateurs décomposent une forme en volumes primaires pour construire l'objet à partir de ces éléments (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 408), comme illustré figure 20.

Figure 20. Exemple de géométrie de construction de solides



Note. L'objet est constitué à partir des primitives A, B, C et D à l'aide des opérations booléennes soustraction et union. Extrait de « *Technical graphics communications* » de G. R. Bertoline, E. N. Wiebe, N. W. Hartman et W. A. Ross, 2009, p. 412.

La modélisation par caractéristiques apparaît à la fin des années 1980 (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 414) et est développée dans les années 1990 (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-9). Les caractéristiques, sont des opérations géométriques 3D que le concepteur affecte à des éléments ou à la totalité de son profil 2D, pour lui donner un volume, e.g. une extrusion, dans le but de remplir une fonction, e.g. un axe de rotation (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-9). La modélisation par caractéristiques permet d'associer « les informations fonctionnelles et d'ingénierie aux

informations géométriques et de forme dans le modèle produit » (Maculet et Daniel, 2004, p. 631).

La modélisation paramétrique est une forme de modélisation par caractéristiques (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-9). Elle implique la définition d'un objet selon un ensemble de paramètres, tels que des contraintes dimensionnelles ou numériques (e.g. des cotes), des contraintes géométriques ou booléennes (e.g. parallélisme, perpendicularité, tangence, coïncidence), et des informations d'ingénierie (e.g. l'attribution d'une densité) (Maculet et Daniel, 2004, p. 631). Selon Lieu et Sorby, (2009, p. 6-15), les contraintes définissent la géométrie du profil, soit sa taille, sa position et son orientation. L'apparition de la dimension paramétrique permet d'évoluer d'une configuration géométrique définie et figée vers une construction évolutive définie par des paramètres et des contraintes (Gladieux, 2006, p. 60). La modélisation paramétrique est aussi nommée conception par contraintes (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 639; Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 283; Maculet et Daniel, 2004, p. 620; Rynne et Gaughran, 2007, p. 56). Les modelleurs volumiques contemporains sont majoritairement paramétriques et obéissent à l'approche par caractéristiques (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 639; Maculet et Daniel, 2004, p. 627).

De nos jours, plusieurs modelleurs volumiques sont hébergés en ligne comme SketchUp (Schell et Esch, 2000) ou la plateforme de modélisation Onshape (Hirschtick *et al.*, 2014). Ces systèmes permettent un accès indépendant d'un poste fixe et offrent la possibilité de travailler à plusieurs sur un projet.

4.2.2 Fonctionnement des modelleurs volumiques

La modélisation 3D « est une simulation informatique qui produit un affichage visuel d'un objet comme s'il existait en 3 dimensions [*is a computer-based simulation that produces a visual display of an object as if it existed in 3 dimensions*] » (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-2). Cette représentation virtuelle de l'objet en cours de conception est nommée maquette numérique (Maculet et Daniel, 2004, p. 624). Un modelleur volumique est constitué d'un *sketcher*, d'un système de modélisation, d'un moteur de contrainte dimensionnelle, d'un gestionnaire de caractéristiques et d'un gestionnaire d'assemblage (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 640). Au cœur du modelleur volumique se trouve une base de données géométriques (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-2).

Les contraintes sont de deux natures : explicites et implicites. Une contrainte est explicite quand l'utilisateur attribue une dimension ou une condition géométrique spécifique à un élément : « une contrainte explicite indique qu'une taille ou un positionnement spécifique d'un élément d'un profil va être contrôlé par une variable, ou un paramètre [*An explicit constraint indicates that a specific size or location of a profile element is going to be controlled by a variable, or parameter*] » (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 424). Par exemple, quand un utilisateur crée un rectangle de longueur L et de largeur l, s'il attribue une dimension de 32 mm à L et une dimension $L \div 2$ à l, alors le modelleur calcule la valeur 16 mm pour l. La valeur de l sera automatiquement modifiée par le modelleur lorsque l'utilisateur modifiera la valeur de L. Pour faciliter la conception, il existe aussi des contraintes implicites, dues aux relations géométriques ou à l'attribution de dimensions automatiques, qui sont générées par le modelleur lors de la création de la géométrie par l'utilisateur. Une contrainte est implicite quand elle est inférée par le modelleur, et non pas définie par l'utilisateur. Ainsi, la création de deux segments très proches du parallélisme peut être interprétée par le modelleur comme la volonté du concepteur de créer

deux segments parallèles et mener le modelleur volumique à appliquer la contrainte de parallélisme à ces segments. Selon Bertoline *et al.* (2009), « comprendre comment un système applique des contraintes géométriques implicites est important pour élaborer une stratégie de création d'esquisses [*understanding how a system applies implied geometric constraint is important to devising a sketching strategy*] » (p. 423). Les contraintes géométriques, dimensionnelles et algébriques sont accessibles dans l'esquisse.

L'arbre de construction liste l'ordre final dans lequel les caractéristiques sont attribuées à l'objet (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-49). Cet arbre permet de modifier individuellement les esquisses et les caractéristiques ou de modifier leur place dans l'arbre de construction. C'est pourquoi on ne peut dire que l'arbre de construction reflète l'historique de construction mais plutôt la séquence finale des caractéristiques appliquées dans la construction du modèle (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 435; Rynne et Gaughran, 2007, p. 58).

Les caractéristiques et les contraintes peuvent être dépendantes d'autres caractéristiques et contraintes. Dans ce cas, les relations père-fils entre les paramètres impactent directement les paramètres fils quand le paramètre père est modifié. Ceci est un exemple de l'associativité qui lie des éléments entre eux : chaque changement d'un élément est répercuté dans les éléments auxquels il est associé par un paramètre. Cela permet la propagation d'un changement d'un profil à l'objet 3D, ou d'un changement d'une caractéristique aux dessins techniques qui peuvent être générés par le modelleur. Cette associativité participe à l'efficacité et à l'utilité attribuées aux modelleurs (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 640; Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 445; Lieu et Sorby, 2009, p. 7-6).

4.2.3 Séquence de création d'une pièce

La création de la structure de base ou d'une caractéristique d'un objet 3D dans un modelleur volumique, telle qu'observée chez les professionnels (Hartman, 2005, p. 11) ou enseignée (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 640; Shah, 2001, p. 57; Wiebe, 1999, p. 19), suit les étapes suivantes :

- choix d'un plan de référence dans un espace 3D, représenté par un repère de coordonnées cartésiennes 3D selon les axes x, y et z, et/ou par trois plans de référence, ou d'un plan associé à une surface plane de l'objet déjà modélisé ;
- esquisse d'un profil 2D sur le plan choisi ;
- dimensionnement et contrainte géométrique du profil 2D ;
- transformation de l'esquisse en solide par balayage d'un élément ou de la totalité du profil 2D.

Le concepteur doit manipuler des entités géométriques dès le début de son activité (Laisney et Brandt-Pomares, 2015, p. 112).

4.3 L'apprentissage de la modélisation 3D

L'avènement de la CAO dans le monde industriel a mené à des modifications profondes des enseignements liés à la conception mécanique. Les cours de dessin industriel et de géométrie descriptive ont disparu des curricula des études d'ingénierie au profit d'enseignements visant à

développer l'apprentissage d'outils de CAO, tels que les modeleurs volumiques, ou d'enseignements ayant recours aux possibilités offertes par ces outils (Ault et John, 2010, p. 13; Barr, 2012, p. 116; Brown, 2009, p. 54; Hamon, 2009, p. 40; Leopold, 2005, p. 40; Poitou, 1984, p. 478; Sorby, 1999a, p. 21). Ces outils, aujourd'hui incontournables, soulèvent la question des compétences nécessaires à leur apprentissage et de leur rôle dans l'apprentissage de la conception (Brown, 2009, p. 56; Hamon, 2009, p. 40).

4.3.1 Connaissances extrinsèques à la modélisation volumique

Ye *et al.* (2004) considèrent que l'utilisation d'outils de CAO requiert des connaissances en mathématiques et en informatique (p. 1454). Selon Lieu et Sorby (2009), les étudiants actuels ont des compétences mathématiques et informatiques, mais ils manquent de compétences mécaniques, autrefois acquises notamment grâce aux enseignements de dessin industriel et à la manipulation d'objets physiques. Cette lacune résulte en un manque de compétences de visualisation 3D, indispensables à l'utilisation des outils de CAO (p. 1-0). En effet, le concepteur doit comprendre les informations numériques qui lui sont données, soit des informations relatives à la taille, à la forme, et à l'orientation (Bertoline, Hartman, *et al.*, 2009, p. 642). Rynne et Gaughran (2007) avancent que l'utilisation efficace de modeleurs paramétriques nécessite de savoir décomposer des éléments géométriques (p. 55). Selon Bertoline *et al.* (2009), 92 pour cent du processus de conception s'appuient sur la représentation graphique (p. 6). Bertoline *et al.* (2009) ajoutent qu'utiliser un système de CAO efficacement nécessitent des connaissances technologiques : l'intention de conception inclut aussi bien la fonction du produit à concevoir que la création d'une géométrie au service de ce produit (p. 643).

4.3.2 Connaissances intrinsèques à la modélisation volumique

Au-delà de la capacité à visualiser des formes en 3D, Wiebe (1999) avance qu'il est nécessaire de comprendre comment un modeler volumique fonctionne : il s'agit de transformer une représentation mentale en 3D en « une base de données géométrique électronique utilisable [*usable electronic geometric database*] » (p. 15). L'auteur remarque que les expériences de construction d'objets réels ne trouvent pas forcément leur équivalent dans les métaphores utilisées dans les modeleurs : le dessin d'un arc à l'aide d'un compas a peu de ressemblance avec le balayage d'une ligne que l'on contraint à l'aide d'une distance à un point (p. 16). Le concepteur doit pouvoir traduire la géométrie propre à l'objet final en caractéristiques géométriques créées dans l'interface. Bien que la maquette numérique ressemble à un objet physique, sa construction diffère de la façon dont un objet physique est fabriqué. Cette construction dépend de la connaissance qu'a un utilisateur des outils géométriques disponibles dans logiciel.

Il est aussi nécessaire de bien identifier l'intention de conception d'une pièce, c'est-à-dire comment la pièce doit être définie, i.e. ses caractéristiques et les relations qui les relient, et comment elle va se comporter quand on effectue un changement (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 415; Rynne et Gaughran, 2007, p. 60). Selon Bertoline *et al.* (2009), l'intention de conception survient lors de la planification des relations qui existent entre les caractéristiques d'une pièce, de manière à bénéficier du gain procuré par la possibilité d'éditer les pièces dans un modeler volumique (p. 415). Lors de la création d'un objet comprenant plusieurs caractéristiques, il est important de bien choisir la caractéristique de base de l'objet, c'est-à-dire celle qui décrit sa

forme générale (Lieu et Sorby, 2009, p. 629), et le profil 2D qui permettra de créer cette caractéristique de base (Rynne et Gaughran, 2007, p. 60).

4.3.3 Connaissances déclaratives et procédurales

Selon le modèle *Adaptive Control of Thought* d'Anderson (1976, cité dans Anderson, 2014), les connaissances sont déclaratives, quand elles sont factuelles et peuvent être décrites, et procédurales, quand elles ne peuvent se manifester que par des comportements (Anderson, 2014, p. 18). Dans le cas de la conception d'un objet à l'aide d'un outil de CAO, les connaissances déclaratives concernent les aspects factuels de la situation de conception, alors que les connaissances procédurales concernent les stratégies utilisées pour réaliser la tâche (Lang *et al.*, 1991, p. 257; Rynne et Gaughran, 2007, p. 57).

La conception d'objets 3D à l'aide d'un outil de CAO nécessite des connaissances déclaratives telles que la connaissance de l'objet à concevoir (Lang *et al.*, 1991, p. 257) et la connaissance des commandes et des procédures qui s'y rapportent (Chester, 2007, p. 23; Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Hartman, 2005, p. 13; Lang *et al.*, 1991, p. 257; Rynne et Gaughran, 2007, p. 59).

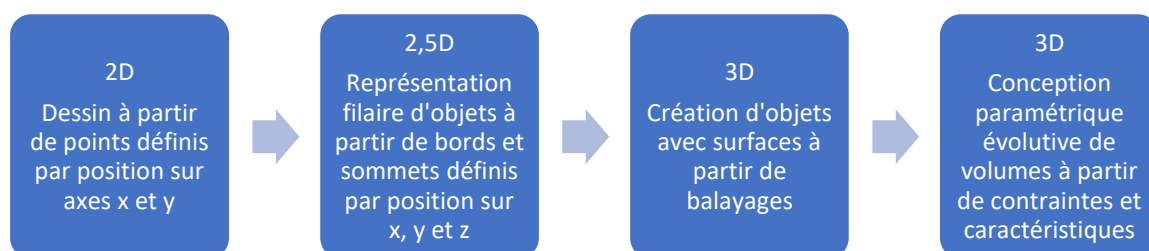
Elle requière aussi des connaissances procédurales comme la connaissance de stratégies pouvant être mobilisées pour réaliser une tâche de conception (Chester, 2007, p. 23; Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Lang *et al.*, 1991, p. 258; Rynne et Gaughran, 2007, p. 59), et l'intention de conception (Rynne et Gaughran, 2007, p. 59). Selon Hamade *et al.* (2005), les connaissances procédurales incluent la compréhension de la nature de l'objet qui permet de développer une stratégie de décomposition de l'objet en caractéristiques simples (p. 316).

Les connaissances déclaratives sont spécifiques à un modeler volumique particulier, alors que les connaissances procédurales sont applicables à tous les logiciels (Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Lang *et al.*, 1991, p. 258).

4.4 Synthèse de ce chapitre

La CAO permet aux entreprises de concevoir rapidement des objets avec fiabilité. Son évolution, illustrée figure 21, a suivi celle des capacités des ordinateurs pour passer de représentations 2D à des représentations 3D.

Figure 21. Évolution de la CAO



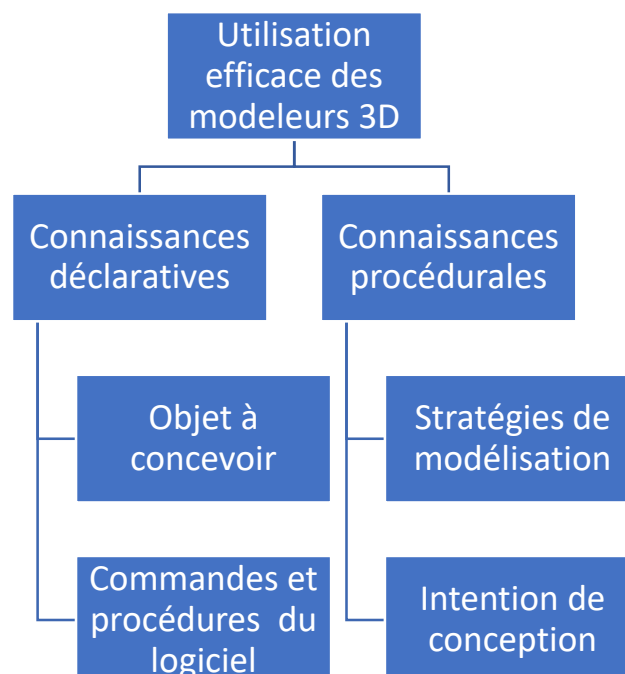
Note. Cet organigramme décrit les quatre phases de développement des modelers volumiques.

Les modeleurs volumiques contemporains permettent la création d'objets 3D à partir d'esquisses 2D composées d'éléments géométriques cotés. L'approche paramétrique permet d'effectuer des changements rapidement grâce à l'associativité des éléments.

L'avènement de la CAO dans le monde industriel s'est répercuté dans le monde de la formation où les enseignements de conception sont désormais dédiés à l'apprentissage des outils de CAO et à la conception à travers ces outils. Les enseignants de CAO identifient des prérequis à la réussite de cet apprentissage tels des connaissances en mathématiques et en géométrie qui permettent de décomposer des objets en entités géométriques simples.

L'utilisation efficace des modeleurs volumiques est d'autre part décrite comme s'appuyant sur des connaissances déclaratives et des connaissances procédurales, comme illustrées dans la figure 22.

Figure 22. Connaissances nécessaires à l'utilisation efficace de modeleurs 3D



Note. Cet organigramme décrit les connaissances nécessaires à l'utilisation des modeleurs volumiques.

Chapitre 5. Premières expérimentations

Afin d'étudier la corrélation entre habileté spatiale et modélisation volumique, nous allons dans un premier temps identifier des outils de mesure et les tester dans des expérimentations. Ce chapitre décrit l'acquisition des outils de mesure et les expériences menées à petite échelle à l'aide de ces outils auprès de sujets variés.

5.1 Identification et acquisition des tests spatiaux

Comme expliqué au chapitre 3, l'habileté spatiale peut être mesurée grâce à des tests spatiaux. Eliot et Smith en regroupent 392 dans leur catalogue publié en 1982 et de nombreux tests ont été créés depuis, comme le *Santa Barbara Solids Test* (Cohen et Hegarty, 2007) et le *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* (Hegarty et Waller, 2004). Cependant, à l'exception des tests commercialisés par *Educational Testing Service*, la majorité des tests sont difficiles d'accès car ils ont été conçus lors de la première et la deuxième phase de la recherche sur l'habileté spatiale décrite par Eliot (1983), c'est-à-dire entre 1904 et 1961, comme décrit au chapitre 2. De ce fait, la plupart de leurs auteurs sont décédés, retraités et parfois inconnus.

Pour augmenter nos chances de trouver des tests, nous avons dans un premier temps identifié les tests les plus mentionnés dans des études récentes et contacté les auteurs. Certains d'entre eux nous ont répondu et ont partagé les copies qu'ils avaient en leur possession, sous format papier ou sous format scanné. Alors que notre portefeuille de tests se développait, nous avons pu procéder à des échanges. Parmi les tests les plus souvent cités dans les études portant sur l'habileté spatiale et les sciences de l'ingénieur, on trouve le PSVT:R, le MRT et le MCT (Agbanglanon, 2019, p. 40; Kelly Jr, 2013, p. 6; Nagy-Kondor, 2017, p. 41; Sorby et Baartmans, 2000, p. 302). Ces trois tests visent à évaluer la visualisation spatiale : le MRT et le PSVT:R mesure la rotation mentale et le MCT mesure la transformation mentale. Nous avons trouvé leurs sujets à la fois en consultant la revue de littérature et en contactant des auteurs. La traduction française du sujet du MRT se trouve en annexe de l'article d'Albaret et Aubert (1996). Le site du *Spatial Intelligence & Learning Center* (SILC) (www.silc.northwestern.edu) présente une liste de tests spatiaux dont certains sont accessibles en contactant l'auteur. Nous avons écrit à Yoon, auteure du R PSVT:R, qui nous a autorisée à utiliser son test, protégé par copyright, à nos fins de recherche (S.Y. Yoon, communication personnelle, 07 juin 2018)¹⁵. Le sujet du MCT a été obtenu en contactant des chercheurs l'ayant cité dans leur étude. Nous avons plus tard eu accès au test de transformation mentale *Santa Barbara Solids Test* (Cohen et Hegarty, 2007) sur le site du SILC.

De manière à évaluer les quatre capacités spatiales définies dans le modèle de Tartre, nos recherches se sont ensuite orientées vers des tests visant à mesurer l'orientation spatiale. Le *Visualization of Views Test* (Guay et McDaniel, 1976) et le *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* (Hegarty et Waller, 2004) sont disponibles sur le site du SILC. Le PSVT:V et le CFT ont été obtenus en contactant les auteurs d'études les citant. Le *Hidden Figures Test* (Ekstrom *et al.*, 1976) et *Hidden Patterns Test* (Ekstrom *et al.*, 1976) sont commercialisés par Educational Testing Service, nous en avons acheté des copies. Nous avons trouvé le lien pour l'ensemble des stimuli du *Leuven Embedded Figures Test* (L-EFT) (de-Wit *et al.*, 2017) dans l'article de ses auteurs.

¹⁵ En Annexe 3.

5.2 Expérimentations des tests spatiaux

Devant la variété de tests papier visant à mesurer l'habileté spatiale, nous avons expérimenté les tests que nous avons pu nous procurer au fil du temps et filmé les sujets en situation de tests, de manière à recueillir des informations concernant à la fois la performance et l'activité des sujets. Les premières expérimentations ont eu lieu avec des personnes de notre entourage et concerné des versions abrégées de trois tests de visualisation spatiale : le MRT, le R PSVT:R et le MCT. Le visionnage des vidéos a révélé des différences de comportements moteurs entre les sujets :

- certains répondants accompagnaient leur réflexion mentale de gestes spontanés des mains et/ou de la tête dans des tâches de visualisation spatiale (figure 23) ;
- d'autres ne manifestaient pas de gestes (figure 24).

Figure 23. Présence de gestes spontanés Figure 24. Absence de gestes spontanés



Note. Sur la figure de gauche, le sujet utilise spontanément ses mains pour résoudre la tâche de rotation mentale. Sur la figure de droite, le sujet n'effectue pas de gestes spontanés.

Nous avons alors regardé les vidéos avec les sujets ayant recours aux gestes spontanés et leur avons demandé d'expliquer ces gestes : ils ont expliqué avoir manipulé les stimuli mentalement et au travers des gestes pour trouver les réponses. Cette observation correspond aux résultats de recherches investiguant la présence et le rôle des stratégies moteurs dans la résolution de problèmes spatiaux mentaux (Chandrasekharan *et al.*, 2010; Chu et Kita, 2008).

D'autre part, ces entretiens ont révélé que certains répondants déclaraient mobiliser des stratégies différentes de celles décrites dans les instructions du test. Par exemple, plutôt que de faire pivoter la pièce mentalement, ils observaient le stimulus à partir d'un autre point de vue pour le comparer avec les réponses possibles.

5.2.1 Expérimentation A

Suite à ces premiers retours, nous avons expérimenté des tests visant à mesurer l'un des quatre facteurs de l'habileté spatiale compris dans le modèle de Tartre (1984), décrits dans le chapitre 3 :

- tests visant à évaluer la rotation mentale : MRT et R PSVT:R ;
- tests visant à évaluer la transformation mentale : MCT et *Santa Barbara Solids Test* (SBST) ;
- tests visant à évaluer un tout réorganisé : PSVT:V, *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* (PTSOT) et *Visualization of Views Test* (VVT) ;
- tests visant à évaluer une partie d'un tout : CFT, *Hidden Figures Test* (HFT), *Hidden Patterns Test* (HPT).

Nous n'avons pas inclus le *Leuven Embedded Figures Test* dans nos expérimentations car l'ensemble des stimuli mis à disposition par les chercheurs sont à combiner pour créer ses propres formes. Nous avons préféré choisir des tests déjà existant et ne pas concevoir un test. Ceci nous permettrait de comparer nos résultats aux études utilisant les mêmes tests que nos expérimentations.

Nous avons formalisé notre première expérimentation selon le protocole A suivant : les premières questions de trois tests de visualisation spatiale ont été sélectionnées, avec pour instruction de communiquer les réponses oralement. Cette instruction visait à éviter les manipulations de stylos étrangères aux gestes spontanés générés pendant la résolution des tâches spatiales. Les temps de passation ont été calculés au prorata des temps indiqués dans les instructions. Les instructions ont été traduites en français. Il était ensuite demandé aux sujets de décrire la manière dont ils avaient répondu aux questions dans un entretien après avoir résolu les questions. Ce même protocole a été appliqué à l'ensemble des tests au fil de leur acquisition.

Les sujets volontaires pour nos expérimentations ont été recrutés dans notre entourage ($n = 8$ dont $n = 4$ enfants et $n = 4$ professionnels), à ISAE-Supméca ($n = 10$) et à l'École Supérieure des Métiers du Sport et de l'Enseignement (ILEPS) ($n = 6$). Nous avons sollicité des étudiants spécialisés en sport pour relever d'éventuelles différences de processus cognitifs, qui pourraient être expliquées par la nature des enseignements suivis.

Les expérimentations ont eu lieu sur plusieurs sessions. Les sujets ont passé les tests en notre possession au moment où les sujets et les tests étaient disponibles : le nombre de sujets a varié en fonction des tests, comme illustré dans le tableau 2.

Tableau 2. Participation des volontaires dans l'expérimentation A

Test	N total	n enfants	n étudiants ISAE-Supméca	n étudiants ILEPS	n professionnels
VVT	14	2	8		4
PTSOT	14	2	8		4
R PSVT:R	20	2	8	6	4
PSVT:V	17	2	8	6	1
MRT	9	2	7		
MCT	15	2	6	6	1
CFT	13	2	5	6	
HFT	11	3	5	3	
SBST	4	4			
HPT	2	2			

Légende. n = nombre de sujets.

Ce tableau indique le nombre et la nature des sujets engagés dans les expérimentations portant sur les tests spatiaux.

Les réponses relevées dans les entretiens portant sur les stratégies et les vidéos ont été encodées selon que les étudiants décrivaient une stratégie de rotation mentale (RM), transformation mentale (TM), orientation spatiale (OS), stratégie analytique (SA), stratégie corporelle (SC) ou une combinaison de plusieurs de ces stratégies. Les fréquences des stratégies déclarées mobilisées par les sujets sont décrites dans le tableau 3.

Tableau 3. Fréquence des stratégies déclarées mobilisées dans l'expérimentation A

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

Légende. RM = rotation mentale, TM = transformation mentale, OS = orientation spatiale, SA = stratégie analytique, SC = stratégie corporelle, N = nombre de sujets.

Ce tableau décrit les stratégies et combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux testés dans l'expérimentation A.

On observe que des stratégies ou des combinaisons de stratégies différentes sont mobilisées dans les tests spatiaux que nous avons testés.

5.2.2 Expérimentation B

Un protocole expérimental B a été défini pour explorer la relation entre les tests spatiaux alors en notre possession et la performance académique d'apprenants engagés dans des études d'ingénierie mécanique comprenant de la modélisation 3D : nous avons organisé deux séances de tests auprès d'étudiants ingénieurs en première année à leur arrivée à ISAE-Supméca.

En septembre 2018, 137 étudiants ingénieurs en première année à ISAE-Supméca, $N_F = 37$ [27%] femmes et $N_H = 100$ [73%] hommes, ont passé le MRT et le MCT et 131 étudiants, $N_F = 36$ [27%] femmes et $N_H = 95$ [73%] hommes, ont passé le R PSVT:R selon les instructions d'administration préconisées. Les étudiants étaient âgés de 18 à 23 ans, la moyenne était de 20,35 ans.

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. Les étudiants ont été informés du cadre, de l'objectif de l'étude, ainsi que de son déroulé. Conformément à la Loi 2018-493 du 20 juin 2018, les répondants ont été informés de leur droit d'accès aux données recueillies durant l'expérimentation. Les participants ont signé un formulaire de consentement préalablement validé par la déléguée à la protection des données d'ISAE-Supméca. L'ensemble des données a été anonymisé.

Le module MAPP aborde la théorie des distributions d'une variable réelle et la transformée de Laplace (ISAE-Supméca, 2018b). Le module AMEC a pour objectif d'enseigner l'analyse « d'un mécanisme industriel pour schématiser sa cinématique, identifier les conditions technologiques de son bon fonctionnement, vérifier par calcul ses performances et proposer une méthode de fabrication de certains de ses composants » (ISAE-Supméca, 2017b). Pour l'évaluation, les étudiants ont eu accès à une maquette numérique dans la base CATIA (version 6). À partir de cette base, ils pouvaient générer différentes représentations du système, dont des coupes transversales. Le module ALGO a pour but l'acquisition « des bases rigoureuses et structurées en algorithmique et en structures de données fondamentales et à connaître les bases du langage C » (ISAE-Supméca, 2018a).

Une analyse de variance des scores spatiaux issus de l'expérimentation B et des notes individuelles des étudiants au premier semestre a mis en évidence le caractère prédictif du MCT, du MRT et du R PSVT:R de la performance en AMEC, ALGO et MAPP (Charles *et al.*, 2019, section Résultats et discussion). Ces résultats sont conformes aux études décrivant le caractère prédictif des tests spatiaux dans la performance académique dans les études technologiques (Sorby *et al.*, 2013, p. 27).

5.3 Synthèse des premières expérimentations

L'expérimentation A a montré qu'il existait différentes stratégies de résolution des tâches spatiales décrites dans les tests spatiaux. La mesure de la performance des sujets ne donne qu'une représentation limitée de leur activité en ce sens qu'elle n'en donne à voir que le résultat.

L'expérimentation B a confirmé la pertinence du lien entre mesure de l'habileté spatiale et mesure de la performance académique des étudiants en première année à ISAE-Supméca.

Notre recherche s'intéresse à la relation entre habileté spatiale et modélisation volumique. Caractériser cette relation ne peut se limiter qu'aux simples produits de ces activités car ceci revient à prendre le risque d'établir des corrélations sans vérifier l'existence de variables cachées. Si nous prenons l'exemple d'un test de rotation mentale pour lequel une corrélation significative existe entre le score à ce test et une note d'AMEC, nous pouvons interpréter ce résultat comme la preuve d'une relation entre la capacité à faire pivoter mentalement un objet et la capacité à réussir une évaluation portant sur l'analyse des mécanismes. Si nous nous intéressons à la manière dont les étudiants ont procédé pour résoudre ces tâches, nous pourrions interpréter de manière plus fiable la corrélation (French, 1965, p. 9; Lohman, 1979, p. 150). Si le test a bien été résolu en faisant tourner l'objet mentalement, alors la corrélation entre rotation mentale et performance en AMEC est avérée. Si le test a été résolu en considérant le stimulus à partir d'un autre point de vue, alors la corrélation entre rotation mentale et performance en AMEC n'existe pas. On peut seulement dire qu'il existe une corrélation entre la performance à un test visant à mesurer la rotation mentale et la performance en AMEC.

De manière à répondre de la manière la plus fiable possible à notre question de recherche, nous décidons d'investiguer les cadres théoriques et méthodologiques relatifs à l'analyse de l'activité de sujets engagés dans des tâches spatiales, telles qu'elles sont présentées dans les tests spatiaux et les exercices de modélisation volumique.

Chapitre 6. Stratégies de résolution de problèmes présentés dans les tests spatiaux

Comme abordé au chapitre 2, la deuxième phase de la recherche sur l'habileté spatiale s'intéresse aux sources de variance dans la performance aux tests spatiaux. Un des axes de recherche concerne les différences de stratégies adoptées par les sujets lors de la résolution des tâches présentées dans les tests spatiaux : certains sujets utilisent des stratégies différentes de celles décrites dans les instructions. Or les instructions décrivent des stratégies de traitement de tâche définies par les auteurs comme correspondant à des compétences spécifiques. Certains auteurs (Barratt, 1953, p. 17; French, 1965, p. 9; Guay, 1980, p. 4; Guay *et al.*, 1978, p. 117; Lohman, 1979, p. 149, 1993, p. 9; Thurstone, 1938b, p. 8) avancent que l'utilisation de stratégies différentes de celles décrites dans les instructions du test remet en cause la fiabilité du test.

Bloom et Broder (1950) avancent que l'étude des différences individuelles au travers de tests doit s'accompagner de méthodes d'investigation des procédés mentaux sous-jacents aux réponses données dans les tests : selon eux, seule cette investigation permet d'interpréter les sources de variance de la performances des sujets (p. 3). Ils relèvent deux catégories d'investigation de ces procédés : inférence du procédé, à partir des actions et des solutions avancées par les sujets, ou exploration des procédés, à partir de rapports rétrospectifs (e.g. rapports écrits, entretiens posttest) ou de commentaires introspectifs (e.g. commentaires à voix haute synchrones à la réalisation de la tâche)¹⁶ (p. 5). Les verbalisations rétrospectives sont cependant sujettes aux révisions des répondants qui peuvent réorganiser les étapes et omettre les impasses rencontrées et les erreurs commises lors la résolution du problème (Bloom et Broder, 1950, p. 6).

Ce chapitre présente différentes méthodes d'investigation des stratégies mobilisées dans les tests spatiaux selon les deux approches décrites ci-dessus :

- exploration des processus : entretiens et rapports rétrospectifs, commentaires à voix haute, observation de gestes spontanés, observation des zones d'activation cérébrale, observation des mouvements oculaires ;
- inférence des processus : inférence des opérations constituant une stratégie, approche componentielle.

Nous y décrirons aussi les catégories holistiques et stratégiques utilisées pour différencier les stratégies de résolution de tâches spatiales, ainsi que les affordances des tests susceptibles d'être à l'origine de ces stratégies.

6.1 Définition de stratégie de résolution de problème spatial

Eme et Marquer (1998) définissent *strategy* comme « des séquences de traitement qui sous-tendent la performance dans les tâches cognitives [*sequences of processing that underlie performance in cognitive tasks*] » (p. 461). Gages (1994) précise la définition d'une stratégie de résolution de problème spatial comme « une méthode de traitement d'information visuelle [*a method of processing visual information*] » (p. 3).

¹⁶ Selon Pilardeau (2008), les deux approches relèvent de la méthode introspective qui « consiste à demander au sujet, au cours de l'exécution d'une tâche ou juste après, de se livrer à une observation intérieure de ses états mentaux et des représentations subjectives accompagnant la tâche qu'il a réalisée » (p. 21).

En combinant ces définitions, nous proposons de définir une stratégie de résolution de problème spatial comme la séquence d'actions destinée à accomplir une tâche spatiale.

6.2 Investigation des stratégies au travers des verbalisations

L'étude de Barratt en 1953 est considérée comme la première à investiguer les stratégies au travers d'entretiens rétrospectifs (Eliot, 1987, p. 53; Lohman, 1979, p. 136; Pilardeau, 2008, p. 50). Elle concerne une batterie de sept tests spatiaux. L'auteur y révèle que les sujets déclarent, d'après l'encodage réalisé, adopter différentes stratégies pour un même test, comme analyser le stimulus à la recherche d'un élément saillant pour le comparer avec les réponses, plier le stimulus ou déplier les réponses dans le cas du *Differential Aptitude Test: Space Relations* (DAT:SR) (Bennett *et al.*, 1947), un test de transformation mentale, (p. 23). Ils indiquent changer de point de vue ou faire tourner le stimulus pour répondre aux questions du *Guilford-Zimmerman Aptitude Survey B* (Guilford et Zimmerman, 1948), un test d'orientation spatiale, (p. 24). L'auteur constate aussi que pour le test de rotation mentale *Figures Test* (Thurstone et Thurstone, 1941), la moitié des sujets déclarent faire tourner la totalité du stimulus, alors que l'autre moitié déclare n'en faire tourner qu'une partie (p. 22).

Par la suite, French (1965) demande à des sujets de commenter à voix haute, puis de décrire dans un questionnaire la manière dont ils résolvent des problèmes issus de huit tests spatiaux. Il constate que ceux-ci décrivent recourir à des stratégies différentes de celles décrites dans les instructions (section *Discussion of the Subsample Results*) : ils utilisent des détails saillants pour retrouver les figures intriquées dans le test d'orientation spatiale *Concealed Figures Test* (Thurstone, s.d., cité par French, 1965), adoptent un raisonnement géométrique pour les tests de transformation mentale *Punched Holes* (Thurstone, s.d., cité par French, 1965) et *Surface Development* (Thurstone, s.d., cité par French, 1965), et analysent le stimulus plutôt que le percevoir dans sa globalité pour le test de rotation mentale *Cubes Test* (Thurstone, s.d., cité par French, 1965).

Dans leur étude sur les stratégies mobilisées dans le test de rotation mentale *Cube Comparisons Test* (French *et al.*, 1963), Just et Carpenter (1984) constatent dans les descriptions verbales posttest des répondants que ceux-ci déclarent faire tourner le cube autour d'axes standards (x, y, z), le faire tourner autour d'un axe direct que le sujet définit selon la question, ou comparer des éléments du cube indépendants de l'orientation de celui-ci sans manipuler l'objet (p. 6).

Rock, Wheeler et Tudor (1989) interrogent aussi leurs sujets après leur expérimentation dans laquelle ils doivent reconnaître la bonne représentation 2D d'objets 3D en fil de fer qu'ils doivent s'imaginer observer à partir d'un point de vue différent (p. 192). Les répondants indiquent avoir identifié un point de repère sur l'objet et imaginé où cet élément devrait se trouver après rotation de l'objet ou après changement de point de vue (p. 200). Ils disent aussi avoir renversé les objets quand les réponses possibles étaient représentées comme si le stimulus avait subi une rotation de 180° (p. 201).

Dans leur étude sur le test de rotation mentale MRT, Albaret et Aubert demandent à leurs sujets de décrire en une phrase la méthode qu'ils ont utilisée pour répondre aux questions. Leur encodage des réponses identifie quatre catégories : faire tourner la figure mentalement, compter les cubes, combiner ces deux stratégies, ou utiliser d'autres méthodes (p. 271). Moreau, Clerc, Mansy-Dannay et Guerrien (2012) investiguent aussi les stratégies mobilisées dans le MRT dans leur étude sur l'effet du sport sur l'habileté spatiale. Ils interrogent leurs sujets après qu'ils

ont passé le test et catégorisent les réponses en quatre conditions : rotation mentale, analyse du stimulus, adaptation de la stratégie à l'item, absence de conscience de la stratégie adoptée (p. 85). Les résultats de ces études sont complétés par les travaux d'Hegarty sur le MRT en 2018. La chercheuse relève cinq stratégies différentes après encodage des entretiens rétrospectifs menés auprès des sujets : rotation mentale, changement de point de vue, comptage des cubes, analyse de la direction des branches de la forme, analyse de l'orientation des extrémités de la forme (p. 1214). Elle constate aussi que les répondants utilisent en moyenne 1,87 stratégies par item et 2,15 stratégies pour l'ensemble des items (p. 1215).

La chercheuse avait auparavant travaillé avec Kozhevnikov à la création d'un test visant à mesurer la capacité à changer de perspective (Kozhevnikov et Hegarty, 2001). Leurs expérimentations sur les deux projets de tests intitulés *Object Perspective Test* et *Map Perspective Test* incluaient des commentaires à voix haute lors de la résolution des problèmes et des entretiens rétrospectifs. Ceux-ci ont dévoilé des stratégies d'identification d'angle, de rotation mentale et de changement de perspective (p. 750).

Workman et Lee (2004) investiguent les stratégies de résolution adoptées dans le test de transformation mentale *Apparel Spatial Visualization Test* (Workman *et al.*, 1999). Les sujets sont interrogés oralement après avoir passé les tests (p. 26). Sept stratégies sont identifiées à l'issue de ces entretiens : analyse du stimulus, extraction d'un point de repère, recherche de similarités, recherche de différences, vérification, prévisions basées sur un savoir préexistant, et réponse au hasard (p. 27). Les répondants indiquent aussi utiliser une combinaison de stratégies pour une réponse ou un changement de stratégie d'un item à un autre (p. 28).

Dans son étude sur l'identification des stratégies mobilisées dans la rotation mentale, Pilardeau (2008) réplique la tâche de Shepard et Metzler (1971), dont sont issues les formes du MRT, et interroge les répondants sur les stratégies qu'ils pensent avoir mises en œuvre, après les avoir enregistré penser à voix haute à différents moments de l'expérimentation (p. 72). L'auteure identifie une stratégie globale pour laquelle la réponse a sauté aux yeux des répondants, une stratégie de rotation globale de la figure, une stratégie de rotation partielle de la figure à partir d'un point de repère, une stratégie de comparaison bout à bout sans rotation, le comptage des cubes pour identifier un élément saillant ou pour vérifier. Elle remarque de plus que les sujets déclarent mettre en œuvre au minimum deux stratégies de résolution, qu'ils utilisent des combinaisons de stratégies et que le choix d'une stratégie dépend du sujet et de l'item (p. 85-86).

Le tableau 4 reprend les stratégies identifiées dans ces différentes études.

Tableau 4. Récapitulatif des stratégies identifiées dans les tests spatiaux

Auteurs	Test	Analyse du stimulus	Extraction d'un point de repère	Recherche de correspondances	Recherche de différences	Vérification	Connaissances antérieures	Rotation mentale	Changement de point de vue	Renversement 180°	Transformation mentale	Estimation d'un angle	Combinaison	Changement de stratégie
Barratt (1953)	<i>Figures Test</i>							✓						
Barratt (1953)	DAT-SR	✓									✓			
Barratt (1953)	<i>Guilford-Zimmerman</i>							✓	✓					
French (1965)	<i>Concealed Figures Test</i>		✓											
French (1965)	<i>Punched Holes, Surface Development</i>						✓							
French (1965)	<i>Cubes Test</i>	✓												
Just et Carpenter (1985)	<i>Cubes Comparisons Test</i>	✓						✓						
Rock, Wheeler et Tudor (1989)	Spécifique à l'étude		✓							✓				
Albaret et Aubert (1996)	MRT	✓						✓					✓	
Kozhevnikov et Hegarty (2001)	<i>Objective Perspective Test</i>							✓	✓			✓		
Workman et Lee (2004)	<i>Apparel Spatial Visualisation Test</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓
Pilardeau (2008)	Tâche de Shepard et Metzler (1971)	✓	✓	✓		✓		✓					✓	✓
Moreau <i>et al.</i> (2012)	MRT	✓						✓						✓
Hegarty (2018)	MRT	✓						✓	✓				✓	✓

Note. Ce tableau indique les stratégies identifiées comme mobilisées dans les tests spatiaux dans la littérature portant sur les stratégies mises en œuvre dans les tests spatiaux.

6.3 Investigation des stratégies au travers de l'observation des manifestations physiques

Dans une des expériences de son travail de thèse, Pilardeau (2008) adapte une version restreinte de la tâche de Shepard et Metzler et enregistre les mouvements oculaires des sujets. Selon l'auteure, les mouvements oculaires permettent « d'inférer les états mentaux sous-jacents d'un comportement manifeste » (p. 162) : ils peuvent être utilisés pour inférer des stratégies, ou leurs étapes, si elles se manifestent au cours de l'activité observée. La chercheuse enregistre les mouvements oculaires des répondants alors qu'ils apprennent à utiliser une des quatre stratégies principales identifiées dans la première expérience, décrite dans la section précédente, soit la stratégie globale, la rotation globale, la rotation partielle, et la comparaison bout à bout (p. 211). Les expérimentations sont suivies de questionnaires qui permettent de vérifier que les sujets ont bien respecté les consignes (p. 194). L'analyse des parcours oculaires, et notamment des zones de fixation, le nombre d'aller-retours et le nombre de fixations permettent de valider les quatre stratégies repérées au travers des verbalisations de la première expérience (p. 214-215).

Selon Kirsh (1995), une des manières dont nous modifions notre environnement pour améliorer notre performance cognitive est le recours à une stratégie complémentaire, soit « la réalisation d'actions externes qui complètent des actions internes [*performing external actions that complement internal actions*] » (p. 214). Kosslyn témoigne d'observations personnelles et de conversations avec Metzler indiquant avoir vu des sujets bouger les mains lors de la réalisation de tâches de rotation mentale (Kosslyn, 1994, p. 345). Chandrasekharan, Athreya et Srinivasan (2010) vérifient cette constatation expérimentalement en observant des sujets effectuer des rotations mentales sur des formes 2D, conçues pour leur étude, en demandant à leurs sujets de répondre oralement (p. 99). Une observatrice note la présence/absence de mouvements des mains. Elle relève des mouvements des doigts, du poignet, du coude et de la tête (p. 100). Elle rapporte que les vingt-trois sujets ont généré des actions pour au moins un item (p. 100).

S'appuyant sur la théorie de Mc Neill (1992), selon laquelle les gestes produits lorsque l'on parle révèlent la dimension imagerie du langage, Chu et Kita (2008) avancent que « les gestes peuvent fournir des éclairages sur le choix de stratégies de résolution de problème adoptées par les adultes [*gestures can provide insights into the choice of problem-solving strategies adopted by adults*] » (p. 706). Les auteurs utilisent des formes adaptées de la tâche de Shepard et Metzler (1971) pour recueillir les gestes spontanés et les verbalisations produits par des sujets dans une tâche de rotation mentale : ils filment les répondants qui indiquent leur réponse oralement à un observateur (p. 709). Leur encodage des gestes spontanés reprend huit catégories : des gestes de manipulation d'objets concurrents au discours, des gestes de représentation d'objets concurrents au discours, des gestes de traçage des arêtes d'objets, des gestes de direction de la rotation, des gestes de localisation d'objets, des gestes représentant les angles entre les stimuli, des gestes indiquant le point de vue à partir duquel la rotation est décrite, des gestes conventionnels de communication (e.g. peut-être), et des gestes sans signification discernable (p. 710). Ils remarquent qu'un cinquième de leur échantillon ne produit pas de gestes (p. 709).

Dans leur revue de question sur la rotation mentale, Hoyek *et al.* (2010) font état de résultats contradictoires issus d'études visant à identifier les zones d'activations cérébrales dans des tâches de rotation mentale (p. 31). Kucian *et al.* (2007) enregistrent l'activité cérébrale d'enfants et d'adultes lors d'une tâche de rotation mentale de dessins d'animaux en 2D. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle révèle une activation de l'hémisphère droit chez les enfants et d'une activation bilatérale chez les adultes (p. 677). Plutôt qu'une différence de stratégies, les auteurs concluent à une différence de maturation et d'expertise pour

expliquer l'activation de l'hémisphère gauche chez les adultes (p. 684). Jansen-Osmann et Heil (2007) enregistrent les électroencéphalogrammes d'enfants, d'adolescents et d'adultes dans une tâche de rotation mentale des lettres F, P, R et L (p. 176). L'extraction des potentiels évoqués indique une activation de l'hémisphère gauche chez les enfants et adolescents et d'une activation bilatérale chez les adultes (p. 177). Les auteurs proposent plusieurs explications possibles : cette différence serait due à une localisation croissante de la rotation mentale dans l'hémisphère gauche avec l'âge. Ils proposent aussi que les enfants auraient recours à une stratégie de rotation mentale par à-coups, alors que les adultes utiliseraient une stratégie de rotation mentale globale de la figure

6.4 Investigation des étapes constitutives d'une stratégie

Plutôt qu'identifier les stratégies de résolution de problème pour expliquer la variance dans la performance, certains chercheurs (Cooper et Shepard, 1973; Just et Carpenter, 1984) s'intéressent aux étapes constitutives d'une stratégie. Cooper et Shepard (1973) investiguent les étapes engagées dans le processus de rotation mentale. Ils présentent à leurs sujets douze caractères alphanumériques asymétriques (F, G, J, R, e, j, k, m, 2, 5, 4, 7), penchés selon des orientations allant de 0° à 180°, et leur demandent si les stimuli sont une version normale ou renversée du caractère d'imprimerie (p. 89). Les auteurs mesurent leurs temps de réponse et en concluent qu'ils confirment le processus de rotation en quatre étapes qu'ils ont défini : détermination de l'identité et de l'orientation du caractère, rotation du caractère, comparaison avec sa représentation habituelle, réponse (p. 135).

Dans leur étude sur le *Cube Comparisons Test* (French, Ekstrom et Price, 1963), Just et Carpenter (1984) ont enregistré les mouvements oculaires de fixation¹⁷ de leurs sujets, en complément des rapports rétrospectifs (p. 11). Les zones de fixation successives leur permettent de définir des séquences. Celles-ci sont rapportées aux différences angulaires nécessaires pour réaliser les rotations du cube (p. 9). Ils attribuent ensuite à chaque fixation, ou à une série de fixations, une étape dans le processus de rotation qu'ils ont déterminé (p. 12, figure 3a). Selon les auteurs, la rotation mentale effectuée dans le *Cube Comparisons Test* commence par une phase de recherche de deux lettres identiques, suivie par une phase de rotation et comparaison (rotations successives de la lettre et comparaisons successives de la nouvelle orientation avec l'orientation cible), et termine par une phase de confirmation, durant laquelle le sujet vérifie la cohérence de cette séquence de rotations avec les autres faces du cube (p. 9).

Dans sa description des habiletés relevant du domaine de la perception visuelle, Carroll (1993) explique la difficulté à définir l'habileté spatiale, et les facteurs qui la composent, au travers des tests par le fait que « la plupart des tâches dans les tests spatiaux, même les plus simples, sont en réalité assez complexes [*most spatial test tasks, even the «simplest», are actually quite complex*] » (p. 309). Selon l'auteur, la plupart des tests exigent de comprendre et d'encoder des formes spatiales, de considérer et parfois de manipuler mentalement ces formes, de prendre des décisions à partir de comparaisons ou d'autres éléments du stimulus, et de formuler une réponse.

¹⁷ « Lors de l'inspection de stimuli visuels, les durées passées sur les deux ou trois détails regardés par seconde correspondent à ce qu'on appelle une fixation » (Pilardeau, 2008, p. 162)

6.5 L'approche componentielle

Cherchant à identifier les opérations mentales sous-jacentes à la performance aux tâches relevant du raisonnement analogique, Sternberg (1977) définit la théorie componentielle du raisonnement par analogie qu'il présente comme « une explication de la manière dont les gens résolvent les problèmes de type A est à B ce que C est à D [*an account of the way people solve problems of the form A is to be B as C is to D*] » (p. 5). Selon l'auteur, résoudre un problème de type analogique peut être décrit comme une combinaison de six composants de traitement d'information (p. 135-136). Le premier est de type identification des attributs : encodage des termes de l'analogie. Les trois suivants sont de type comparaison des attributs : inférence de la règle reliant A à B, cartographie de la règle reliant A à C et application de la règle pour obtenir D. Le composant justification est optionnel et sert à vérifier la validité des opérations. Le dernier composant est le contrôle dans lequel le sujet suit le processus de solution et transforme la solution en réponse. Un temps de réalisation est attribué à chaque opération et l'addition des temps des opérations réalisées dans chaque combinaison permet de déterminer le temps d'une combinaison (p. 137). Les différents composants peuvent être combinés dans des ordres différents et l'analyse componentielle consiste en la décomposition d'une tâche et l'identification des différentes combinaisons potentielles des composants lors de la résolution de la tâche (Lohman et Kyllonen, 1983, p. 106). Le modèle de la séquence est exprimé en une équation de régression multiple dans laquelle la variable dépendante est le temps de réalisation et la ou les variable(s) indépendante(s) est/sont chaque composant de la séquence ; la valeur de variable indépendante est le nombre, pour les variables discrètes, ou la quantité, pour les variables continues, d'exécutions d'opérations (Kyllonen *et al.*, 1981, p. 5).

Par la suite, plusieurs chercheurs (Lohman et Kyllonen, 1983; Pellegrino *et al.*, 1985) étudiant l'habileté spatiale s'intéressent aux processus de traitement des informations présentées dans les tests spatiaux. Ils décomposent les processus opérant lors de la résolution des problèmes posés dans les tests spatiaux, ainsi que les différentes combinaisons de processus possibles : cette analyse présuppose que les sujets adoptent la même stratégie à tous les items d'un même test (Cooper et Mumaw, 1985, p. 81; Lohman et Kyllonen, 1983, p. 109).

Lohman et Kyllonen (1983) conçoivent un test pour lequel des polygones doivent être mémorisés, synthétisés, pivotés et assemblés (p. 123). Ils déterminent les tâches qu'ils estiment devant être réalisées pour passer le test et leurs temps de résolution : temps d'encodage du stimulus, temps de construction de la synthèse à partir des stimuli, temps de rotation du stimulus, temps de comparaison pour retenir ou rejeter la proposition (p. 125). Ils définissent plusieurs modèles de stratégies de résolution dont ils vérifient la mobilisation à l'aide des temps de réponse (p. 127). Ceci leur permet de définir plusieurs stratégies pour les étapes d'encodage, de construction et de comparaison. Selon ces auteurs, l'encodage, ou mémorisation, peut être réalisé en analysant les caractéristiques de la figure, en la décomposant ou en la nommant (p. 127). La construction, ou synthèse, peut être effectuée en synthétisant les unités simples en un produit unique, en changeant de stratégie selon la complexité du produit à composer (e.g. synthèse de la structure composée quand celle-ci est simple ou mémorisation des unités quand le produit est complexe), en synthétisant les stimuli présentés en fin de séquence, ou en synthétisant les stimuli dans l'ordre de complexité des produits intermédiaires (p. 128-129). Finalement, la comparaison peut être réalisée en comparant de manière exhaustive toutes les caractéristiques des stimuli, en comparant les stimuli dans leur globalité, ou en changeant de stratégie (comparaison des caractéristiques ou comparaison globale) en fonction de l'étape de construction (p. 129-130).

Peu après, Pellegrino, Mumaw et Shute (1985) adaptent le test de visualisation spatiale *Minnesota Paper Form Board* (Likert et Quasha, 1970). Ils déterminent que, selon le stimulus, entre trois et cinq procédés sont nécessaires pour réaliser la tâche (p. 50). L'encodage des pièces, la comparaison des pièces et la décision sont les trois procédés communs à tous les items, alors que les procédés de recherche d'une pièce correspondante et de rotation des pièces pour les ajuster sont applicables aux items pour lesquels les stimuli ont été placés selon un angle différent. En utilisant des combinaisons de stimuli composées de manière à mobiliser trois, quatre ou cinq des procédés présumés et en relevant les latences¹⁸ des sujets, ils valident les éléments constitutifs de leur modèle (p. 56).

Le tableau 5 reprend les éléments constitutifs de stratégie identifiés dans ces études.

Tableau 5. Récapitulatif des composants identifiés dans les stratégies

Auteurs	Test	Analyse du stimulus	Comparaison	Recherche de correspondances	Rotation mentale	Réponse	Transformation mentale	Changement de stratégie
Cooper et Shepard (1973)	Spécifique à l'étude	✓	✓		✓	✓		
Just et Carpenter (1985)	<i>Cubes Comparisons Test</i>	✓	✓	✓	✓			
Carroll (1993)	Généralité	✓	✓		✓	✓	✓	
Lohman et Kyllonen (1983)	Spécifique à l'étude	✓	✓		✓		✓	✓
Pellegrino, Mumaw et Shute (1985)	Adaptation du <i>Minnesota Paper Form Board</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Note. Ce tableau indique les composants identifiés comme mobilisés dans la résolution de tâches spatiales dans la littérature portant sur les composants mis en œuvre la résolution de tâches spatiales.

6.6 Stratégie analytique versus stratégie holistique

Dans son investigation des stratégies mobilisées dans le *Relative Movement Test* (Bond et Miller, 1947), Lucas (1953) demande à des sujets de décrire à voix haute comment ils répondent aux questions (p. 1). L'encodage des réponses produit trois catégories : une catégorie dite spatiale concernant « l'habileté à percevoir les dispositions d'objets dans l'espace [*the ability to perceive patterns of objects in space*] » (Lucas, 1953, p. 8), une seconde catégorie dite déductive décrite comme « l'application des principes de raisonnement de sens commun à des énoncés du problème sans aucun recours à la représentation mentale [*the application of common sense principles of reasoning to the statements in the problem without any «picturing»*] » (Lucas, 1953, p. 8), et une troisième catégorie déductive et spatiale combinant les deux premières catégories.

¹⁸ Temps qui s'écoule entre le moment où commence à s'appliquer un stimulus et le moment où apparaît la réponse (Office québécois de la langue française, 1989).

Guay *et al.* (1978) avancent que le traitement analytique, qui « implique un traitement explicite au coup par coup de la vérification des relations entre différents éléments d'une figure [*involves explicit trial-and-error checking of relationships between different parts of a figure*] » (p. 117), ne correspond pas à un traitement spatial car il n'implique pas « la transformation d'images visuelles [*the transformation of visual images*] » (Guay, 1980, p. 7). En revanche, un traitement *Gestalt*, c'est-à-dire « la formation et transformation d'images visuelles mentales prises comme un tout organisé [*forming and transforming mental visual images of figures as organized wholes*] » (Guay *et al.*, 1978, p. 116) est « le composant cognitif clef de l'habileté spatiale [*the key cognitive component of spatial ability*] ». Guay, McDaniel et Angelo (1978) interrogent leurs sujets après qu'ils ont passé une batterie de neuf tests de visualisation spatiale et d'orientation spatiale (p. 119-121). Ils graduent ensuite les réponses sur une échelle allant de 1 à 6 pour décrire le degré de traitement analytique appliqué dans la résolution des items : le chiffre 1 indique un niveau analytique très élevé et le chiffre 6 un niveau *Gestalt* très élevé. Les auteurs en concluent que les tests mobilisant une stratégie analytique ne sont pas fiables pour mesurer l'habileté spatiale (p. 125).

Lohman (1979) en revanche conclut des résultats de French (1965) à propos du *Cubes Test* que French décrit les stratégies analytiques, telles que s'appuyer sur des termes géométriques, comme pouvant comprendre des éléments visuels (p. 141). Lohman (1979) avance que tous les tests spatiaux « nécessitent des compétences de résolution de problème analytiques [*require analytic problem solving skills*] » (p. 190) et qu'ils « mesurent les compétences de résolution de problème spatiaux, pas forcément l'habileté spatiale analogique [*measure spatial problem solving skills, not necessarily analog spatial ability*] » (p. 190). Pellegrino, Mumaw et Shute (1985) considèrent aussi la stratégie analytique comme une stratégie spatiale car elle implique « un mode spatio-analytique de traitement dans lequel le détail et la précision spatiaux sont maintenus et accentués [*a spatial-analytic mode of processing in which spatial detail and precision are maintained and emphasized*] » (p. 75). De même, Hegarty (2018) déduit des travaux de Just et Carpenter (1984) qu'« une stratégie de rotation mentale par à-coups implique la décomposition d'une image mentale en parties, la rotation mentale d'une partie de l'image correspondant à la figure à comparer, et ensuite d'appliquer la même rotation aux autres parties de l'image pour vérifier si elles correspondent ¹⁹ » (p. 1216).

Eme et Marquer (1998) mènent une étude visant à identifier les stratégies mobilisées dans un test de comparaison de polygones de complexité variable (Cooper, 1976) et à démontrer la validité des verbalisations pour identifier ces stratégies (p. 461). L'encodage des rapports rétrospectifs produit sept catégories :

- stratégie holistique : les formes sont encodées et comparées dans leur entièreté ;
- stratégie analytique : analyse et mémorisation des caractéristiques de base des formes, comparaisons successives des caractéristiques et élimination ;
- stratégie verbal-analytique : analyse verbale de la forme et mémorisation de propositions verbales, comparaisons et éliminations successives des propositions ;
- stratégie partielle : encodage de la forme globale et analyses de certaines caractéristiques, comparaison des caractéristiques, vérification de la forme globale ;
- stratégie caractéristique unique : encodage et mémorisation d'un élément saillant, comparaison à partir de ce point de repère ;

¹⁹ A piecemeal strategy involves decomposing the mental image into pieces, mentally rotating one part of the image into congruence with the comparison figure, and then applying the same rotation to the other parts of the image to see if they match.

- stratégie de changement : changement de stratégie, analytique ou holistique, selon la complexité des formes i.e. stratégie holistique pour les formes simples, stratégie analytique pour les formes complexes ;
- stratégie de changements multiples : allers et retours entre deux ou plus de deux stratégies pour un item (p. 465).

L'enregistrement des temps de réponse permet aux auteurs de conclure que des sujets peuvent utiliser des stratégies différentes pour des temps de réponse équivalents (p. 472).

Les processus de résolution de problème décrivant la mobilisation d'un objet, 2D ou 3D, sont ici définis soit comme analytiques, autrement nommés par à-coups, soit de type *Gestalt*, autrement nommés holistiques (Eme et Marquer, 1998, p. 460; Guay et McDaniel, 1978, p. 116-117; Hegarty, 2018, p. 1216).

6.7 L'affordance des tests

Gibson (2015) crée le concept d'affordance pour décrire la complémentarité existant entre un agent et son environnement : l'affordance pointe à la fois vers l'objet et vers son observateur, c'est un élément de l'environnement et du comportement (p. 119). En effet, percevoir un objet signifie percevoir non pas les qualités de cet objet mais les actions que cet objet offre (p. 126). Par conséquent, différents objets présentent différentes affordances pour la manipulation (p. 120). Un environnement, un objet, un agencement offre des affordances : l'agencement d'un objet dans son environnement offre une affordance composée de ces deux éléments (p. 127) et son affordance est perçue si l'agencement est perçu (p. 124). Cette invitation à l'action ne dépend cependant pas des besoins de l'observateur : l'affordance est perçue ou pas par l'observateur, mais elle existe et demeure la même quels que soient la perception ou les besoins de l'observateur (p. 130). De même, les valeurs et le sens qu'elle porte ne sont pas négociables par l'observateur (p. 132) : les informations portées par l'affordance, tel que l'agencement, s'adressent à l'observateur et l'invitent à l'action (p. 133).

Salmani Nodoushan (2021) précise la notion d'affordance en l'opposant à celle de fonction dans le cas des tests. La fonction d'un test concerne l'usage spécifique et délimité d'un test, alors que ses affordances concernent les autres raisons pour lesquelles les affordances du test, sans rapport avec la compétence visée par le test, sont engagées (p. 129). Prenant l'exemple d'une chaise, l'auteur explique que la fonction de la chaise est de permettre de s'asseoir, mais que d'autres affordances sont possibles, comme par exemple monter dessus. Cette seconde affordance est définie comme affordance périphérique. On peut similairement distinguer la fonction d'un test qui vise à mobiliser et à mesurer un processus mental, soit son affordance principale, des affordances périphériques, i.e. les processus mentaux réellement mobilisés, que le test peut générer p. 130).

6.7.1 Affordance des tests QCM

La majorité des tests spatiaux se présentent sous forme de questionnaires à choix multiples, pour lesquels les sujets doivent choisir une ou plusieurs réponses parmi des alternatives. Les réponses de ces tests sont prédéterminées et corrigées objectivement (Hopkins, 1998, p. 214; Snow, 1993, p. 50 et 58). Ce type de tests, à la différence des questionnaires à réponse ouverte, n'encourage pas la production d'une réponse indépendante de la part du sujet (Bloom et Broder, 1950, p. 63; Hopkins, 1998, p. 244). Les QCM peuvent être répartis en deux catégories : ceux dont la réponse peut être élicitée à partir des instructions et ceux dont les réponses proposées

doivent être consultées pour répondre à la question (Bloom et Broder, 1950, p. 58). Cette deuxième catégorie contraint à opter pour des stratégies de résolution de problème de type comparaison, élimination, sélection, qui ne sont pas disponibles lorsque le sujet doit construire sa réponse sans choisir parmi des réponses possibles (Lohman, 1979, p. 149; Lohman et Kyllonen, 1983, p. 122). Dans le cas du MRT et du CFT, on ne peut répondre qu'en consultant les choix possibles, ceux-ci faisant partie de la question : pour ces deux tests, le sujet doit comparer les réponses possibles avec le stimulus, les retenir ou les écarter. Ce type de QCM favorise la production de réponses indépendante des choix offerts (Bloom et Broder, 1950, p. 63).

En revanche, les instructions des problèmes présentées dans le PSVT:V, le R PSVT:R, et le MCT invoquent une solution sans qu'il soit nécessaire de consulter les réponses possibles : celles-ci servent alors à confirmer la réponse obtenue par le répondant, ou à le leurrer. Le R PSVT:R présente la particularité que le sujet doit éliciter une règle à partir de l'exemple afin de l'appliquer au stimulus. La formulation de la réponse comporte alors au moins deux étapes : identifier la règle, puis l'appliquer.

Finalement, la combinaison de tests dans une batterie se prêtant à différentes stratégies et visant à mesurer différentes capacités pourrait influencer la performance lors de la résolution des problèmes qui y sont présentés parce que la succession des tests entraînent un ennui, une fatigue ou un apprentissage (American Psychological Association, s.d.a). Cet « apprentissage fortuit [*incidental learning*] », qui a lieu au travers des tests situés en début de batterie, pourrait limiter le nombre de stratégies mises en œuvre (Schwartz, 1963, p. 684).

6.7.2 Affordance de la limite de temps de réponse

La majorité des tests spatiaux décrits ici sont des tests limités dans le temps, comme dans le cas du PSVT:V et du MCT, ou très limités dans le temps, dans le cas du MRT et du CFT. Les tests de niveau, c.-à-d. non-limités dans le temps comme le R PSVT:R, permettent la mise en œuvre d'une plus grande variété de stratégies (Schwartz, 1963, p. 684). Snow (1980) avance que les capacités mesurées dans les tests spatiaux limités dans le temps et les tests non-limités dans le temps, ainsi que les procédés qui y sont mobilisés, sont différents : les tests de niveau permettent la mobilisation de stratégies analytiques ou verbales (p. 18). Bodner et Guay (1997) avancent qu'un temps d'épreuve court restreint le recours à la stratégie analytique et c'est la raison pour laquelle ils limitent le temps de réponse du ROT à 10 minutes (p. 8).

La double contrainte présentée dans les instructions de répondre correctement et dans un temps limité influence la performance car elle modifie le style de réponse des sujets (Hopkins, 1998, p. 143) et en particulier ceux des femmes qui préfèrent ne pas répondre plutôt que deviner la réponse lorsqu'elles sont limitées dans le temps (Cooke-Simpson et Voyer, 2007, p. 185).

6.7.3 Affordance des stimuli

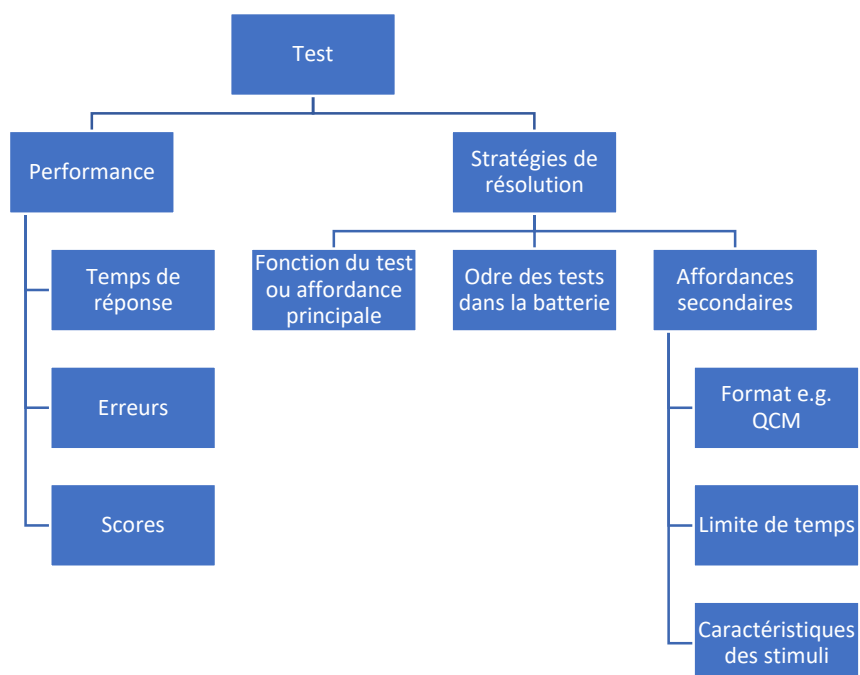
Les stimuli présentent des différences d'affordances de par leurs caractéristiques, l'environnement dans lequel ils sont présentés ou leur agencement. Le PSTOT présente des objets organisés en cercle autour d'un centre, soit un agencement, et demande aux sujets de reporter leurs réponses sur un cadran à l'aide de flèches. Kozhevnikov et Hegarty (2001) constatent que les questions du PSTOT peuvent être répondues, non pas en changeant de point de vue, mais en évaluant l'angle entre deux stimuli comme on le fait sur un cadran ou en faisant pivoter l'angle ou l'agencement des objets (p. 750).

Just et Carpenter (1984) relèvent deux stratégies de rotation possibles dans leur étude sur le *Cube Comparisons Test* : une stratégie de rotations successives autour des axes x, y et z définis par le cube, et une stratégie de rotation directe autour d'un axe défini par le sujet spécifique à l'item (p. 22). Ils remarquent cependant que la stratégie de changement de perspective n'est pas mobilisée. Ils en concluent que celle-ci est plus applicable aux grands objets alors que la rotation mentale concernerait les objets d'une taille manipulable. Les stimuli utilisés dans les instructions du R PSVT:R sont des cubes tronqués présentés sur une surface plane, comme pour le *Cube Comparisons Test* : les deux stratégies de rotation mentale y sont susceptibles d'y être mobilisées.

6.8 Synthèse du chapitre

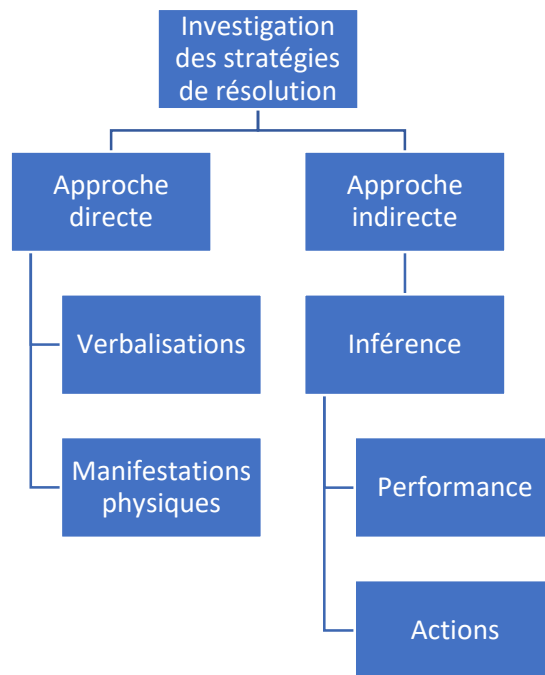
Les sources de variance dans les tests peuvent être analysées à partir de la performance des sujets et à partir des stratégies de résolution qu'ils mettent en œuvre dans les tests. Ces stratégies sont sujettes aux affordances des tests et à l'ordre des tests lorsque ceux-ci sont placés dans une batterie. Ces deux sources sont illustrées dans la figure 25.

Figure 25. Performance et stratégies de résolution : sources de variance dans les tests spatiaux



Les stratégies de résolution peuvent être explorées directement, à partir des verbalisations et des manifestations physiques des sujets, ou inférées, à partir de la performance et des actions des sujets. Ces deux approches sont illustrées dans la figure 26.

Figure 26. Approches d'investigation des stratégies de résolution



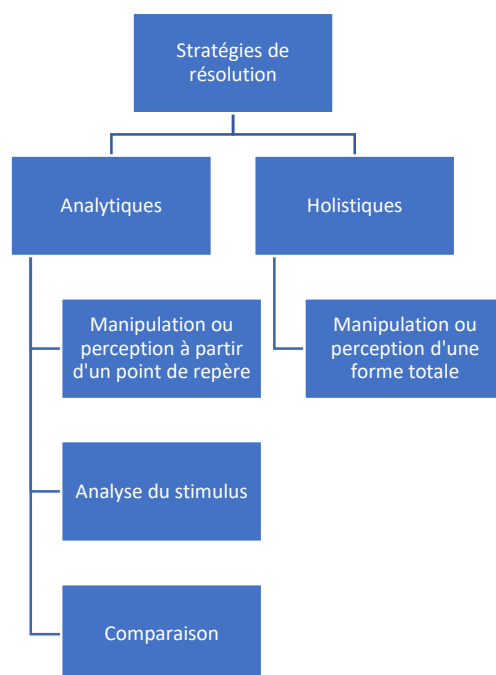
Ces approches présentent des avantages et inconvénients que nous pouvons identifier grâce à une analyse des forces, des faiblesses, des possibilités et des menaces (FFOM) des différentes approches illustrées dans le tableau 6.

Tableau 6. Analyse FFOM des protocoles d'investigation des stratégies

	Forces	Faiblesses	Opportunités	Menaces
Verbalisations	Minimisation de l'interprétation	Conscience des stratégies inégale Capacité des sujets à verbaliser inégale Oubli et/ou édition de la stratégie réellement mobilisée	Différents formats : questionnaire, entretien Différentes temporalités : pendant, après Triangulation avec approche complémentaire	Fiabilité de l'encodage
Observation des gestes spontanés	Observabilité	Protocole expérimental lourd : matériel, disposition	Triangulation avec approche complémentaire	Qualité de l'enregistrement ou de l'observation Fiabilité de l'encodage
Observation des mouvements oculaires	Observabilité	Protocole expérimental lourd : matériel, disposition Chronophage : 1 sujet à la fois	Triangulation avec approche complémentaire	Interprétation des temps et zones de fixation
Observation de l'activité cérébrale	Observabilité	Protocole expérimental lourd : matériel, disposition Chronophage : 1 sujet à la fois	Triangulation avec approche complémentaire	Interprétation des activations cérébrales contradictoires dans la littérature
Inférence des composants	Modèle présumé et développé par le chercheur	Sujet à interprétation car pas d'observation des sujets : fondé sur la performance	Triangulation avec approche complémentaire	Interprétations pouvant occulter différentes stratégies, e.g. temps de réponse similaires pour des stratégies différentes

Les stratégies de résolution identifiées comme mobilisées dans les tests spatiaux sont fréquemment classées selon deux catégories : les stratégies holistiques, dont les traitements concernent la totalité d'une forme ou d'un objet, et aux stratégies analytiques, dont les traitements concernent un élément saillant d'une forme ou d'un objet. Cette classification est illustrée dans la figure 27.

Figure 27. Stratégies holistiques versus stratégies analytiques.



Chapitre 7. Stratégies de modélisation

Au-delà de l'apprentissage du fonctionnement des modeleurs volumiques, les enseignants de CAO se soucient que leurs étudiants apprennent des stratégies de modélisation efficaces (Hamade *et al.*, 2005, p. 308; Lang *et al.*, 1991, p. 257; Lieu et Sorby, 2009, p. xxv; Rynne et Gaughran, 2007, p. 55) : « utiliser des systèmes de modélisation paramétrique ne se limite pas à presser des touches, choisir dans des menus ou sélectionner des outils dans un logiciel [*using PM CAD systems productively is not about pressing buttons, menu picking or software tool selection*] » (Rynne et Gaughran, 2007, p. 60).

La modélisation volumique ayant vocation à faire gagner du temps de conception et à produire des maquettes destinées à être partagées, il est important que les modèles soient réalisés rapidement et permettent d'effectuer des changements aisément (2015). Cette économie des opérations et cette flexibilité sont prioritaires dans la détermination de la séquence des éléments constitutifs du modèle.

Lemaire (2015) recommande d'étudier les stratégies de manière directe, c'est-à-dire en relevant des indicateurs comportementaux externes au travers de protocoles verbaux, d'enregistrement vidéo ou d'observation directe (p. 47). Quand cela n'est pas possible, on peut recourir aux méthodes indirectes grâce auxquelles on peut inférer les stratégies « à partir des variations de performance (i.e. vitesse et/ou précision) en fonction de différents paramètres comme les caractéristiques des stimulus » (p. 48).

Selon Bloom et Broder (1950) et Lemaire (2015), l'inférence des stratégies à partir de la performance des sujets, tel le temps de réalisation, pose le problème de la fiabilité des processus mis en œuvre par les répondants (p. 5 et p. 50). Pour un même indicateur, plusieurs interprétations sont possibles : un temps de réponse identique à deux sujets peut être dû à des stratégies différentes en termes de nombre, de nature ou d'ordre de processus qui les composent.

Bloom et Broder (1950) et Lemaire (2015) marquent leur préférence pour l'exploration des procédés (p. 5 et p. 47). Bloom et Broder (1950) en soulèvent cependant les limites : par exemple, la qualité d'un recueil des données au travers de protocoles verbaux est dépendante de la capacité des sujets à expliciter et décrire verbalement des procédés mentaux, ce pour quoi ils n'ont pas été nécessairement formés (p. 23). Exprimer verbalement des processus mentaux relève de la capacité à utiliser la représentation qu'est le langage pour « accéder à leur représentation de la tâche et à leur planification de la résolution » (Pilardeau, 2008, p. 19). D'autre part, les stratégies ne sont pas toujours conscientes et donc verbalisables (Bloom et Broder, 1950, p. 90; Lemaire, 2015, p. 41; Lohman, 1979, p. 191).

Ce chapitre présente différents éléments de décision à prendre en considération lors du choix d'une stratégie de modélisation à l'aide d'un modeleur volumique. Nous y décrirons aussi plusieurs méthodes d'investigation des stratégies de modélisation volumique.

7.1 Définition de stratégie

Le *APA Dictionary of Psychology* définit le terme *strategy* comme « un programme d'action destiné à atteindre un but ou à accomplir une tâche [*a program of action designed to achieve a goal or accomplish a task*] » (American Psychological Association, s.d.b). Lemaire (2015) insiste sur le fait qu'à la différence d'une stratégie militaire, une stratégie en psychologie cognitive « n'a pas pour unique but de réussir la tâche » et que « c'est par elle qu'un participant

accomplit la tâche » (p. 39) : une stratégie peut mener à un échec ou à un succès. Les stratégies varient par la nature, le nombre et l'ordre des processus qu'elles engagent (p. 43). Une stratégie dont le nombre et la nature des processus est identique à une autre mais dont l'ordre des processus est différent est appelée une variante (p. 44).

Chester (2007) définit le savoir stratégique en modélisation volumique comme « la connaissance de méthodes alternatives par lesquelles une tâche spécifique peut être réussie et le processus par lequel un choix peut être fait [*knowledge of the alternate methods by which a specific task may be achieved and the process by which a choice is made*] » (p. 26).

7.2 Éléments de décision dans le choix d'une stratégie de modélisation

Selon Rynne et Gaughran (2007), il convient de considérer l'objet à modéliser non pas comme une masse mais comme une composition de caractéristiques (p. 61). Comme expliqué au chapitre 4, la modélisation démarre toujours par une esquisse en 2D comprenant des contraintes géométriques et dimensionnelles. Selon Bertoline *et al.* (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009), il est important de considérer l'ordre de création des caractéristiques avant la création de la géométrie (p. 415). Rynne et Gaughran insistent que la géométrie de l'esquisse de la première caractéristique est la plus critique de toutes, puisque les esquisses et extrusions ultérieures reposent sur elle (p. 60). La forme de base doit décrire la forme globale de la pièce à modéliser et permettre de minimiser le nombre de caractéristiques total (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-55; Rynne et Gaughran, 2007, p. 61). Chaque esquisse est liée à la caractéristique qui en résulte et chaque caractéristique requiert sa propre esquisse (Rynne et Gaughran, 2007, p. 61).

Dans le cas d'une pièce comportant plusieurs caractéristiques, et autant de fonctionnalités, l'utilisateur doit faire des choix quant à la stratégie qu'il va adopter. Wiebe (1999) propose une liste de stratégies possibles à explorer lors de l'élaboration de l'intention de conception :

- regroupement de plusieurs caractéristiques dans un balayage unique ;
- définition d'une caractéristique à l'aide de plusieurs balayages ;
- séquence de balayages la plus appropriée ;
- réutilisation de constructions géométriques en les copiant ou en copiant leur image inversée ;
- alignement d'axes de symétrie avec les plans du référentiel (p. 21).

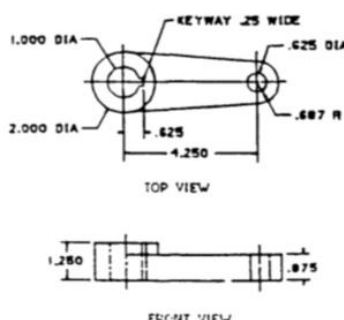
Concevoir des produits fiables est un enjeu industriel : les produits sont soumis à des variations, dues notamment à des défauts de fabrication, qui, si elles sont ignorées, engendrent des coûts (Caro, 2004, p. 1). Une conception robuste vise à « optimiser les paramètres de conception d'un produit et de son procédé de fabrication afin de réduire la sensibilité de ses performances aux incertitudes » (p. 1). Un profile complet est contraint par des contraintes géométriques et dimensionnelles (Bertoline, Wiebe, *et al.*, 2009, p. 426; Lieu et Sorby, 2009, p. 6-20). Un modèle robuste est un modèle bien contraint (Lieu et Sorby, 2009, p. 6-21). La conception doit aboutir à un objet bien contraint mais peut passer par des phases de sur-contrainte et de sous-contrainte (Maculet et Daniel, 2004, p. 630). Un profile est sous-contraint quand des spécifications sont manquantes. Il est sur-contraint quand des contraintes contradictoires ou redondantes ont été déterminées. La sur-contrainte du profile peut être due à une erreur de conception ou à la rencontre de contraintes implicites et de contraintes explicites contradictoires. Le modelleur indique cette contradiction par exemple par un message d'alerte. L'utilisateur doit alors supprimer la et les contraintes contradictoires pour résoudre la situation.

Bertoline *et al.* (2009) considèrent que savoir quand un profile est sous-contraint, bien contraint ou sur-contraint est central dans le développement d'une stratégie de modélisation (p. 423).

7.3 Investigations des stratégies de modélisation 3D

La première étude consacrée aux stratégies de modélisation est menée par Lang *et al.* (1991). Les chercheurs comparent l'activité de concepteurs novices et experts en filmant 31 étudiants en cours de CAO ainsi que deux professionnels de la CAO. Ces sujets doivent produire un dessin contenant trois vues projetées²⁰ (de dessus, de face et de gauche) et une vue isométrique²¹ à partir de la vue de dessus et de la vue de côté cotées d'un objet illustrées dans la figure 28. Ils demandent d'autre part à ce que la surface de la section résultant d'une coupe transversale verticale située à mi-chemin entre les centres des deux cercles soit calculée. L'objet est réalisé à l'aide d'un modelleur filaire 3D, CADD4X (Computervision, 1983), qui permet d'interagir à l'aide d'un clavier et d'un stylet relié à une tablette. À partir du listing et du tracé remis par les étudiants, les auteurs relèvent les indicateurs variété des commandes et nombre d'erreurs de syntaxe pour observer les connaissances déclaratives des sujets, et l'indicateur nombre de commandes utilisées pour évaluer leurs connaissances procédurales. Les novices utilisant 23% plus de commandes que les experts, les chercheurs en concluent que les experts ont utilisé des stratégies différentes.

Figure 28. Vues données de l'objet à modéliser dans l'expérience de Lang *et al.* (1991)



Note. Ces deux illustrations représentent les vues de dessus et de face cotées données de l'objet à modéliser dans l'expérience de Lang *et al.* (1991). Extrait de « Extracting and using procedural knowledge in a CAD task », de G. T. Lang, R. E. Eberts, M. G. Gabel et M. M. Barash, 1991, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 38, 3, p. 259.

Les chercheurs investiguent cette différence en filmant l'écran, le clavier et la tablette de deux experts et deux novices. Ils identifient la séquence des quatorze étapes qu'ils jugent nécessaires à la modélisation de l'objet et retrace les séquences de modélisation des sujets à partir de cette structure. Les auteurs identifient deux stratégies de modélisation : une stratégie orientée vers la fonction dans laquelle les buts secondaires de production des éléments géométriques de l'objet (i.e. deux cercles, une rainure de clavette, les lignes qui rejoignent les cercles) sont organisés vers les buts principaux : les fonctions (i.e. dessiner, rogner, projeter). Une séquence de modélisation correspondant à cette stratégie est illustrée figure 25 b. La seconde stratégie, illustrée figure 25 a, est liée aux objets : les buts principaux concernent la création successive des différents éléments de l'objet. Dans cette stratégie, chaque objet est dessiné et soumis aux

²⁰ En dessin technique, un objet est présenté selon des vues qui sont des projections orthogonales de l'objet vu de face, d'arrière, de dessus, de dessous, de gauche et de droite.

²¹ Représentation en perspective d'un objet dans laquelle les axes de comparaison ont des échelles égales (Office québécois de la langue française, 2012b).

fonctions individuellement. En d'autres mots, la géométrie 2D de tous les éléments de l'objet est regroupée puis soumise au balayage dans la stratégie orientée fonction, alors que la géométrie 2D et le balayage sont associés à la création successive des éléments dans la stratégie orientée objet. Les chercheurs constatent que la stratégie orientée fonction produit moins de transitions, illustrées par les boucles dans les figures 29 et 30, entre les étapes identifiées dans la séquence idéale et en concluent qu'elle est plus efficace.

Figure 29. Exemple de séquence orientée objet

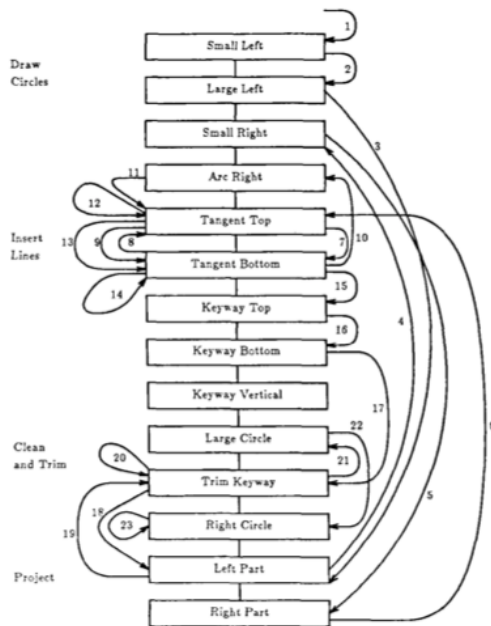
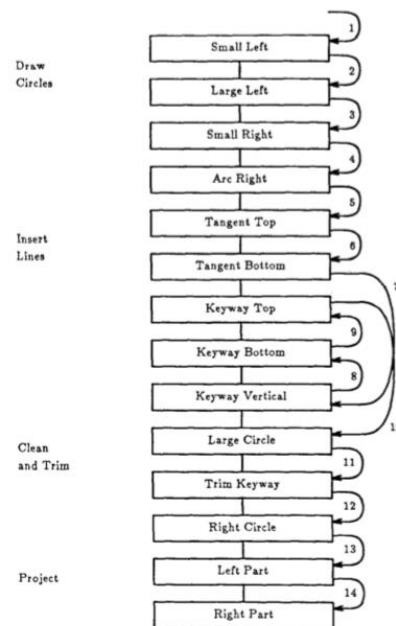


Figure 30. Exemple de séquence orientée fonction



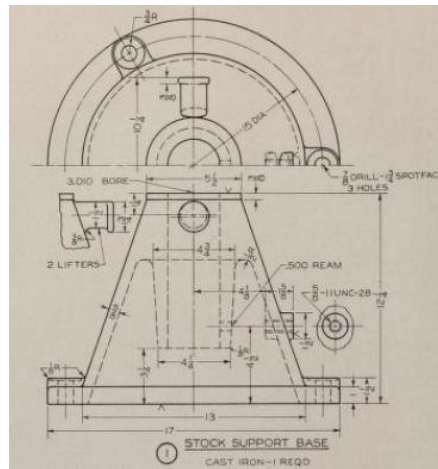
Note. Ces deux illustrations représentent des exemples de séquences orientée objet et orientée fonction de l'expérience de Lang *et al.* (1991). Extrait de « Extracting and using procedural knowledge in a CAD task », de G. T. Lang, R. E. Eberts, M. G. Gabel et M. M. Barash, 1991, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 38, 3, p. 264 et 262.

Hartman (2005) investigate les stratégies de modélisation d'experts en enregistrant les commentaires à voix haute de cinq concepteurs de produits durant une tâche de modélisation, à partir de deux vues orthographiques, illustrées figure 31 (Giesecke *et al.*, 1986, p. 476), d'un système de support. Certains concepteurs utilisent le modèleur paramétrique Pro/ENGINEER (Pro/ENGINEER, 1988) et d'autres le modèleur paramétrique SolidWorks (SolidWorks, 1995). De même que dans l'étude de Lang *et al.*, Hartman constate que certains concepteurs regroupent autant de géométrie que possible dans une esquisse avant de lui attribuer une caractéristique, alors que d'autres créent des entités séparées. L'analyse des verbatim permet à l'auteur de déterminer les étapes communes à l'ensemble des sujets :

1. choix du plan ;
2. esquisse du profile ;
3. ajout des contraintes géométriques ;
4. ajout des dimensions ;
5. application des caractéristiques ;
6. répétition des étapes 1-5 pour ajouter des entités ;
7. ajout de caractéristiques de retrait de matière, e.g. un trou ;

8. ajout de caractéristiques de finition, e.g. un congé.

Figure 31. Vues orthographiques utilisées pour la tâche de modélisation de l'expérience de Hartman (2005)



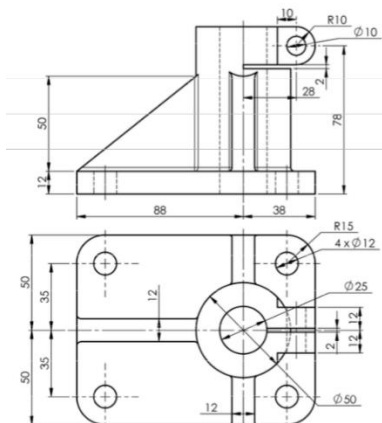
Note. Ces deux illustrations représentent deux vues orthographiques cotées données de l'objet à modéliser dans l'expérience de Hartman (2005). Extrait de « *Technical Drawing* » (8e éd.), de F. E. Giesecke, A. Mitchell, H. C. Spencer, I. L. Hill et J. T. Dygdon, 1986, p. 476.

Dans le but d'améliorer les dispositifs de formation à la modélisation volumique, Hamade *et al.* (2005) analysent les évaluations de dix-neuf étudiants en cours de CAO. Celles-ci concernent la modélisation de quatre objets différents, mais de difficulté équivalente, à l'aide de Pro/ENGINEER (Pro/ENGINEER, 1988). Ces évaluations sont réparties sur la durée du cours de CAO. Les sujets disposent d'un dessin présentant plusieurs vues cotées dont une vue isométrique de l'objet à modéliser. Les chercheurs relèvent le temps de réalisation et le nombre de caractéristiques. Il n'est pas précisé comment le nombre de caractéristiques est repéré. Les chercheurs avancent que les concepteurs experts utilisent moins de caractéristiques, que les caractéristiques qu'ils utilisent sont plus complexes et que leur temps de réalisation sont plus courts que ceux des novices parce qu'ils planifient efficacement leur conception. Ils constatent que le temps de réalisation des étudiants et le nombre de caractéristiques diminue avec chaque nouvelle évaluation. Ils en concluent que le nombre de caractéristiques est un indicateur du temps de réalisation et que l'enseignement de la CAO devrait se concentrer sur l'enseignement de stratégies de modélisation rapides, c.-à-d. comportant un nombre de caractéristiques restreint.

Rynne et Gaughran (2007) souhaitent aussi contribuer à l'amélioration de la formation à la CAO. Ils observent quatre étudiants, ayant reçu 35 heures de formation à la CAO, modéliser un objet à l'aide de SolidWorks (SolidWorks, 1995) à partir de deux vues projetées, de dessus et de côté, cotées, illustrées dans la figure 32. Les auteurs relèvent le nombre de caractéristiques qu'ils complètent à partir de l'observation des étudiants en situation de modélisation. Les auteurs considèrent cette méthode plus fiable que l'observation de l'arbre de construction car celui-ci omet quand des suppressions de caractéristiques ou d'esquisses ont lieu. La manière dont les observations sont réalisées n'est pas précisée. Les auteurs constatent que malgré un temps de réalisation illimité, un seul étudiant parvient à réaliser la pièce. Les auteurs attribuent les scores obtenus, qu'ils considèrent médiocres, à une visualisation spatiale faible (dont les auteurs ne précisent pas l'outil de mesure), à l'incapacité à lire les projections (deux des participants n'avaient pas reçu de formation en dessin technique) et à l'incapacité à créer un

modèle mental avant d'entamer la modélisation. Ces auteurs n'utilisent pas le nombre de caractéristiques pour évaluer les stratégies de modélisation de leurs sujets car le seul étudiant ayant réussi l'évaluation a produit plus de caractéristiques que deux des autres sujets : l'un d'entre eux a produit peu de caractéristiques car il a annulé et recommencé certaines actions.

Figure 32. Vues projetées utilisées pour la tâche de modélisation de Rynne et Gaughran (2007)



Note. Ces deux illustrations représentent deux vues projetées cotées de l'objet à modéliser dans l'expérience de Rynne et Gaughran (2007). Extrait de « Cognitive modeling strategies for optimum design intent in parametric modeling (PM) », d'A. Rynne et W. F. Gaughran, 2007, *Computers in Education Journal*, vol. 18, 3, p. 63.

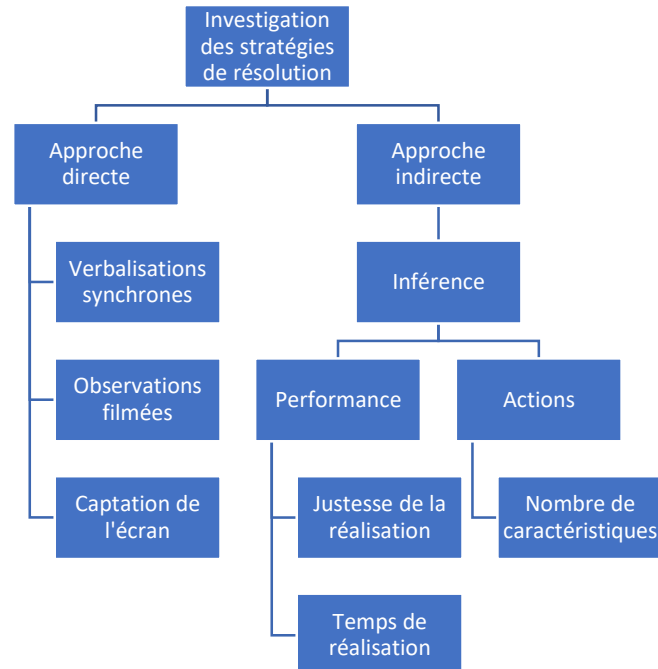
Chester (2007) cherche aussi à développer l'expertise d'étudiants en CAO en intégrant à leur formation des éléments de savoir stratégique. Il soumet deux groupes d'étudiants à deux dispositifs pédagogiques différents lors d'un cours d'introduction à la CAO. Dix-sept apprenants suivent le cours classique et dix-sept étudiants suivent un cours enrichi d'éléments relatifs à la stratégie (prévision, planification, contrôle, révision) et à la visualisation spatiale (dessin et tâches manipulatoires tactiles et informatisées). Les sujets sont interrogés sur leur expérience de CAO 2D et 3D. L'auteur enregistre l'activité à l'écran des apprenants lors de la réalisation de neuf tâches de modélisation et récupère les fichiers de CAO correspondants, pour croiser les informations en cas de besoin. L'auteur a déterminé, grâce à une étude pilote réalisée auprès d'experts, une liste de stratégies jugées expertes : génération efficace du modèle, choix de caractéristique permettant des changements, choix de technique de modélisation privilégiant les caractéristiques plutôt que la géométrie, identification d'opportunités de répétition e.g. copie, miroir. Les réalisations des groupe témoin et groupe test sont évaluées à partir d'indicateurs de performance : réussite de la modélisation, nombre de stratégies expertes utilisées, temps de planification de la tâche et temps de réalisation. L'auteur ne constate pas de différence significative entre les groupes en termes d'expérience préalable, pas de différence dans le temps de planification et un taux de réussite similaire pour les deux groupes. Il remarque en revanche une différence significative dans le nombre de stratégies expertes pour le groupe test et une corrélation négative entre expérience 2D et nombre de stratégies expertes.

7.4 Synthèse

La modélisation paramétrique permet un gain de temps grâce à l'associativité des éléments constitutifs d'un modèle : la modification d'un élément est propagée à l'ensemble des éléments qui lui sont associés. Cette associativité requière une planification minutieuse de l'activité de modélisation de manière à bénéficier et à garantir cette flexibilité au cours de la modélisation.

Les stratégies de résolution peuvent être explorées directement, à partir des verbalisations et des observations des sujets ou de leur activité à l'écran, ou inférées, à partir de la performance et des actions des sujets. Ces deux approches sont illustrées dans la figure 33.

Figure 33. Approches d'investigation des stratégies de résolution



Ces approches présentent des avantages et inconvénients que nous pouvons identifier grâce à une analyse des forces, des faiblesses, des possibilités et des menaces (FFOM) des différentes approches illustrées dans le tableau 7.

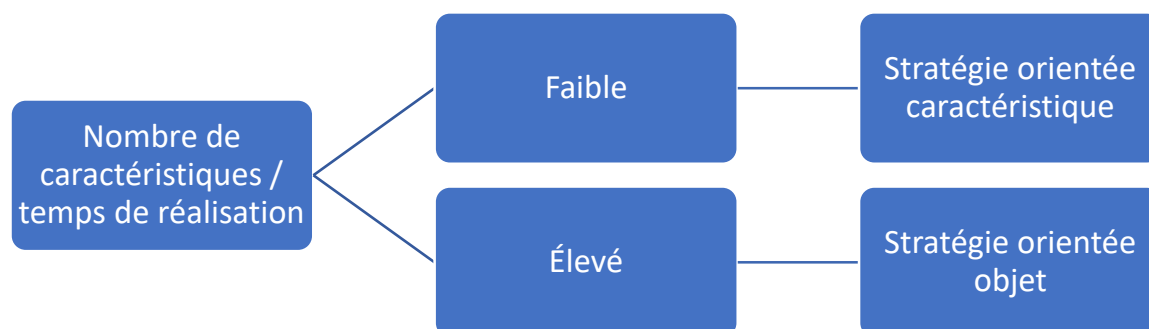
Tableau 7. Analyse FFOM des protocoles d'investigation des stratégies

	Forces	Faiblesses	Opportunités	Menaces
Commentaires à voix haute	Minimisation de l'interprétation	Conscience des stratégies inégale Capacité des sujets à verbaliser inégale Protocole expérimental complexe : disposition du matériel d'enregistrement pour limiter le bruit de fond	Triangulation avec approche complémentaire	Fiabilité de l'encodage
Observations filmées des apprenants	Observabilité	Protocole expérimental lourd : matériel, disposition Obstruction potentielle de la zone de filmage (e.g. mouvement de l'utilisateur) Traitement des données chronophage dû à la durée des vidéos et au nombre de vidéos par apprenant	Triangulation avec approche complémentaire	Qualité de l'enregistrement Fiabilité de l'encodage
Captation de l'activité à l'écran	Observabilité Protocole expérimental discret	Pas d'information sur l'activité de l'utilisateur en cas d'absence d'activité à l'écran Pas d'information directe sur la manipulation du clavier Pas d'information sur la direction du regard de l'utilisateur Traitement des données chronophage	Triangulation avec approche complémentaire, e.g. fichiers de CAO	Qualité de l'enregistrement ou de l'observation Fiabilité de l'encodage

		dû à la durée des vidéos		
Inférence des stratégies	Modèle présumé et développé par le chercheur	Sujet à interprétation car pas d'observation des sujets : fondée sur la performance (temps de réalisation, justesse de la modélisation) et les actions (nombre de caractéristiques)	Triangulation avec approche complémentaire	Interprétations pouvant occulter différentes stratégies (e.g. temps de réponse similaires pour des stratégies différentes) et le recommencement de certaines actions

Les auteurs investiguant les stratégies de modélisation de novices et d'experts en CAO (Chester, 2007; Hamade *et al.*, 2005; Hartman, 2005; Lang *et al.*, 1991) identifient deux approches : une approche privilégiant le regroupement d'éléments géométriques sous une même caractéristique, et une approche privilégiant la création de plusieurs caractéristiques, illustrées figure 34. Selon Rynne et Gaughran, Chester, Hamade *et al.* et Lang *et al.*, les pratiques expertes sont caractérisées par un nombre de caractéristiques restreint et une stratégie de modélisation orientée caractéristique.

Figure 34. Approches orientées objet et caractéristique



Chapitre 8. Caractériser l'activité

La résolution de problèmes spatiaux, présentés sous forme de tests ou d'exercices de modélisation, met en jeux des actions réalisées par les sujets engagés dans ces tâches. Ce chapitre présente les cadres théoriques de la théorie de l'activité, de l'analyse de l'activité et de l'analyse des traces, qui permettent de qualifier, d'analyser et de caractériser certains observables de ces tâches.

8.1 Théorie de l'activité

La théorie de l'activité de Leontiev, issue des travaux de Vygotsky, trouve ses origines dans la critique des approches comportementalistes, selon lesquelles l'action est une réponse à un stimulus extérieur (Olry, 2019, p. 108). La théorie de l'activité affirme au contraire que l'action est orientée vers un but et motivée par l'atteinte de ce but (Rogalski, 2013, p. 2). Elle est organisée en trois niveaux : activité, action et opération (Olry, 2019, p. 111; Savoyant, 2010, p. 94). L'activité vise à satisfaire un motif. Elle est composée d'une série d'actions orientées vers des buts concrets. Ces actions sont exécutées selon les moyens de réalisation disponibles pour atteindre les buts. Le mode d'exécution de l'action, déterminé par les conditions de réalisation, est l'opération. L'action est donc caractérisée par le but à atteindre, les opérations décrivent le mode d'exécution de l'action et les conditions de réalisation de l'action déterminent les opérations.

Une activité peut être réalisée selon différentes séquences d'actions (Olry, 2019, p. 112; Savoyant, 2010, p. 95). Inversement, une action peut intervenir dans différentes activités. De même, une action peut être effectuée à partir de différentes séquences d'opérations et une opération peut intervenir dans différentes actions.

Savoyant (2010) complète la définition de l'action de Leontiev, caractérisée par le but, les opérations et les conditions spécifiques d'exécution, d'autres attributs :

- « *L'objet* de l'action constitué par le matériel de départ à transformer » (p. 97) ;
- « *Le mécanisme (ou processus)* d'accomplissement de l'action défini par l'ordre dans lequel sont exécutées les opérations » (p. 98) ;
- Une base d'orientation chez le sujet (p. 98) ;
- « *Le produit* de l'action qui est le résultat réel obtenu par la réalisation de la suite des opérations » (p. 98).

8.2 Analyse de l'activité

L'analyse psychologique du travail reprend la distinction entre tâche et activité et s'intéresse à définir la relation qui les articule (Leplat, 2004, p. 102). Une tâche correspond au « but à atteindre et les conditions dans lesquelles il doit être atteint » alors que l'activité décrit « ce qui est mis en œuvre par le sujet pour exécuter la tâche » (p. 204). Une tâche est prescrite alors que l'activité est effective : l'activité correspond aux but et conditions réellement pris en compte par le sujet. De ce fait, l'activité réalisée ne correspond pas toujours à la tâche prescrite. Cette distinction est importante car elle permet de comprendre que l'activité dépend non seulement de la tâche mais aussi des caractéristiques du sujet qui l'exécute.

Selon Rogalski (2013),

L'activité est ce que développe un sujet lors de la réalisation de la tâche : non seulement ses actes extériorisés, mais aussi les inférences, les hypothèses qu'il fait, les décisions qu'il prend, ce qu'il fait et ce qu'il se retient de faire ; l'activité comprend aussi la manière dont le sujet gère son temps et son état personnel — charge de travail, fatigue, stress, plaisir pris au travail –, ainsi que ses interactions avec autrui dans la situation de travail. (p. 2)

Au fur et à mesure que le travail a évolué de tâches manuelles vers des tâches intellectuelles, les chercheurs ont recentré leur attention sur des observables de l'activité cognitive des sujets pour caractériser l'activité de leurs sujets (Leplat, 2004, p. 104). En effet, celle-ci s'exerce parfois sur des représentations mentales et parfois sur des objets (p. 105). Leplat décrit deux méthodes pour analyser l'activité cognitive, qui est inobservable et qui doit être induite à partir d'activités observables :

- l'observation des activités dans des conditions normales de réalisation : e.g. observations filmées, à l'aide de « moyens informatiques utilisables pour l'exploitation » (p. 105), étude de l'exploration visuelle ;
- l'observation d'activités provoquées par l'analyste : e.g. verbalisations simultanées ou consécutives.

Évoquant les habiletés nécessaires à l'exécution d'un travail, Leplat distingue tâche et habileté :

Toute analyse des habiletés est liée à celle des activités dans lesquelles elles s'expriment et de celles des tâches auxquelles elles répondent. L'habileté ou la compétence est un concept abstrait qui ne peut être analysé qu'à travers des manifestations observables de l'activité. (p. 104)

Ainsi, selon Leplat, les habiletés répondent à des tâches et s'expriment dans des activités et c'est « l'analyste qui doit susciter des variations de la tâche propres à provoquer les manifestations utiles qui lui permettent de déterminer les habiletés nécessaires au travail » (p. 104).

En résumé, l'analyse de l'activité permet de caractériser ce que fait un individu pour exécuter une tâche. L'analyse de l'activité de plusieurs sujets engagés dans la même tâche permet de plus d'identifier des régularités, i.e. ce qui est commun dans les déterminants et l'organisation de l'activité, et des spécificités, i.e. les différences individuelles (Rogalski, 2013, p. 4). Les habiletés se manifestent dans des tâches qui les provoquent (Leplat, 2004, p. 104).

8.3 Analyse des traces

L'analyse de l'activité, au travers d'observations d'activités normales ou provoquées par l'analyste, s'appuie sur les traces laissées par cette activité. Ces traces sont produites notamment par l'interaction entre des individus et des outils informatiques (Jaillet, 2009, p. 15) et l'interaction entre des individus (p. 23). Elles peuvent être récupérées dans l'outil informatique, quand elles existent, et grâce au filmage des interactions. Les traces laissées par les individus utilisant des systèmes informatiques, les conversations entre plusieurs personnes, les gestes effectués dans la réalisation d'une tâche sont autant de traces de l'activité de ceux qui les produisent au moment où ils exécutent ces tâches. Ces traces sont analysables grâce à diverses

méthodes telles que l'analyse du discours et l'analyse des gestes. Pour ce faire, elles doivent être repérées, caractérisées et relevées.

Jaillet (2009) définit une méthode d'extraction des données issues d'interactions entre individus et systèmes informatiques en six étapes (p. 28-29) :

1. création d'un dispositif de recueil des données qui ne laissent pas de traces dans le système informatique et recueil des données (celles qui laissent des traces et celles qui n'en laissent pas) ;
2. traduction des données relevées pour les rendre intelligibles ;
3. catégorisation des données en vue de traitements statistiques ;
4. modélisation des données pour dégager les relations inter-données en lien avec la recherche ;
5. contrôle des données issues des traitements et de leur modélisation pour éviter des interprétations dues à des effets ;
6. stabilisation de la méthode de traitement des données afin de la rendre reproductible.

Les données extraites et contrôlées peuvent alors être traitées statistiquement. Selon son objectif de recherche, on utilisera :

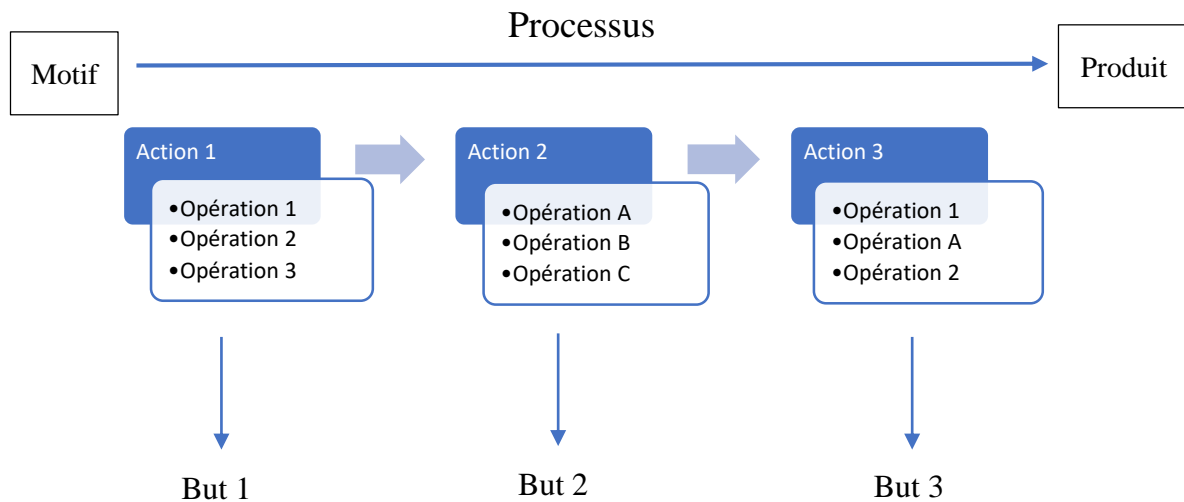
- les méthodes supervisées, si on vise à identifier de manière exploratoire d'éventuelles récurrences dans les données recueillies ;
- les méthodes non-supervisées, si on cherche à déterminer les relations entre des variables préalablement identifiées (p. 28).

L'auteur insiste néanmoins sur la relative fiabilité des traces que l'on prétend analyser : rappelant le mythe de la caverne de Platon (Platon, 2002, cité dans Jaillet, 2009), il insiste sur la part d'interprétation inévitable que l'analyste fait des ombres projetées sur le mur de la caverne (p. 16 et p. 31).

8.4 Synthèse

L'activité est motivée par un motif et composée d'une séquence spécifique d'actions, faites d'opérations déterminées par les moyens de réalisation. Les actions peuvent être communes à plusieurs activités, de même que les opérations peuvent être communes à plusieurs actions. Ce processus est illustré dans la figure 35.

Figure 35. L'activité selon Savoyant (2010)

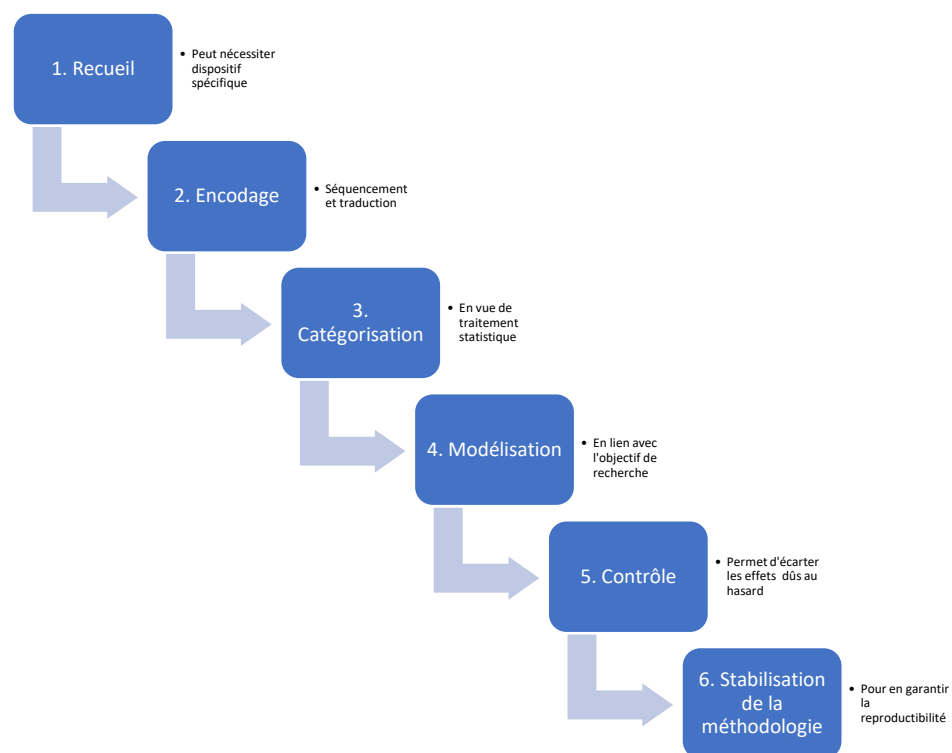


Note. Ce schéma illustre les étapes du processus de l'activité, initiée par un motif et résultant en un produit. Adapté de « Éléments d'un cadre d'analyse de l'activité : quelques conceptions essentielles de la psychologie soviétique (1979) », de A. Savoyant, 2010, Travail et Apprentissages, vol. 5, 1, p. 94-95.

Cette activité peut être observée et analysée pour la distinguer de la tâche qu'elle tend à réaliser. L'activité est spécifique à un individu mais des éléments de son organisation ou certains de ses déterminants peuvent être communs à plusieurs individus.

Parmi les observables de l'activité, on peut s'intéresser aux traces laissées par les individus engagés dans des tâches dans les outils informatiques qu'ils manipulent ou dans les observations provoquées de leur activité. Pour être traitées statistiquement, elles doivent d'abord suivre un traitement de recueil et de caractérisation, illustré figure 36.

Figure 36. Méthodologie d'extraction des données de Jaillet (2009)



Note. Ce schéma décrit les étapes de la méthodologie définie par Jaillet (2009) pour extraire des données. Adapté de « Traces et histoires de traces », de Jaillet (2009). Dans F. Larose et A. Jaillet (dir.), *Le numérique dans l'enseignement et la formation : Analyses, traces et usages*, p. 28-29. L'Harmattan.

Chapitre 9. Problématique retravaillée

Ce travail vise à qualifier la relation existant entre l'habileté spatiale et la modélisation volumique. Les premières expérimentations que nous avons menées ont révélé qu'il existait différentes stratégies de résolution des tâches présentées dans les tests spatiaux. Cette mise en évidence nous a conduite à investiguer la littérature se rapportant aux stratégies de résolution de problèmes spatiaux, tels qu'ils sont présentés dans les tests spatiaux et les exercices de modélisation volumique. Ce chapitre décrit comment ce nouveau pan de littérature nous a menée à redéfinir notre problématique.

9.1 Problématique initiale

Comme présenté dans le chapitre 2, depuis les années 1960, la littérature issue de la recherche sur l'habileté spatiale s'intéresse à la relation qu'elle entretient avec les STIM (Bodner et Guay, 1997; Hegarty *et al.*, 2009; Leopold *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2013; Tartre, 1990) et notamment avec la capacité à modéliser en 3D (Agbanglanon, 2019; Branoff et Dobelis, 2012b; Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012).

La méthodologie des travaux qui adressent la spécificité de la modélisation volumique s'articule autour de protocoles expérimentaux concernant des prises de mesure de visualisation spatiale auprès d'étudiants engagés dans des cursus comprenant l'apprentissage de la modélisation volumique. Trois de ces études (Branoff et Dobelis, 2012b; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012) s'intéressent à la relation entre performance à des tests de visualisation spatiale et performance à des exercices de modélisation 3D. Hamlin *et al.* (2006) se penchent sur la relation entre performance à des tests de visualisation spatiale et perception des apprenants de leur facilité à apprendre à utiliser les modeleurs volumiques. Agbanglanon (2019) étudie la relation entre performance à des tests de visualisation spatiale et stratégies de résolution de dyades impliquées dans un exercice d'amélioration de systèmes mécaniques à l'aide d'un modeleur volumique. Outre le fait que ces études aient en commun le choix de mesurer la visualisation spatiale de leurs sujets, elles partagent aussi un protocole expérimental mettant en œuvre des situations de modélisation 3D après que les étudiants ont reçu des enseignements visant l'apprentissage de cette activité.

La relation entre habileté spatiale et modélisation 3D est aussi abordée sous l'angle de l'étude de l'efficacité de dispositifs pédagogiques visant à améliorer la performance en visualisation spatiale grâce à la pratique de la modélisation 3D (Górska, 2005; Martín-Dorta *et al.*, 2008; Onyancha *et al.*, 2009; Sorby, 1999a). Dans l'étude de Górska, les enseignements incluant de la modélisation 3D via la CAO permettent d'augmenter significativement la performance des apprenants au MCT (p. 203). Sorby constate des résultats similaires pour le MCT dans son étude (p. 4.465.2). Martín-Dorta *et al.* décrivent une amélioration des scores significative au MRT et au DAT:SR suite à un enseignement comprenant la manipulation d'objets physiques, le dessin à la main de ces objets et leur modélisation avec Google SketchUp (version 5) (p. 509). Onyancha *et al.* constatent une amélioration significative des scores à une version adaptée du PSVT:R et du PSVT:V après un cours d'introduction à la CAO (p. 165).

Notre travail vise à explorer la relation existant entre l'habileté spatiale, qui comprend la visualisation spatiale et l'orientation spatiale, et la modélisation 3D au travers de modeleurs volumiques. Cette relation peut être investiguée en considérant la performance des apprenants confrontés à des tâches spatiales : existe-t-il un lien entre la performance à des tests visant à mesurer l'habileté spatiale et la performance à un exercice de modélisation volumique

d'apprenants découvrant l'activité de modélisation 3D ? Après que les apprenants ont reçu des enseignements de sciences de l'ingénieur, dont l'apprentissage de la modélisation volumique, ces performances évoluent-elles ? Ces évolutions sont-elles liées ?

9.2 Évolution de la méthodologie

Nos premières expérimentations ont fait apparaître une variété de stratégies de résolution de problèmes spatiaux. Celles-ci sont décrites aussi bien dans la recherche dédiée aux tests spatiaux (Albaret et Aubert, 1996; Hegarty, 2018; Just et Carpenter, 1984; Lohman et Kyllonen, 1983; Pilardeau, 2008), que dans les études consacrées aux stratégies de modélisation volumique (Chester, 2007; Hamade *et al.*, 2005; Hartman, 2005; Lang *et al.*, 1991). Cette variété de stratégies reflète la différence entre tâche prescrite et activité.

En complément de l'étude de la performance d'apprenants engagés dans des tâches spatiales, nous souhaitons observer leur activité pour identifier et caractériser les processus cognitifs de représentation spatiale qui y sont investis : quelles sont les stratégies mises en œuvre dans des tâches mobilisant les représentations mentales spatiales, telles qu'elles sont présentées dans les tests spatiaux ? Une fois ces stratégies identifiées, nous proposons d'en vérifier leur efficacité en étudiant leur lien avec la performance aux tests : existe-t-il un lien entre la performance et les stratégies de résolution ?

De même, nous souhaitons investiguer les processus cognitifs engagés dans les activités de modélisation 3D, individuelles et collectives, pour les caractériser, puis étudier leur lien avec leur efficacité : existe-t-il un lien entre stratégies de modélisation 3D et réussite à ces tâches, qui mobilisent des représentations mentales spatiales et la manipulation d'un artefact numérique ? Suite à des enseignements, ces performances et processus cognitifs évoluent-ils ?

Notre recherche vise à explorer la relation entre habileté spatiale et modélisation 3D selon quatre dimensions :

- lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles (Albaret et Aubert, 1996; Cooke-Simpson et Voyer, 2007; Gold *et al.*, 2018; Piaget et Inhelder, 1977; Somers *et al.*, 2015) ;
- lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles (Branoff et Dobelis, 2012; Steinhauer, 2012) ;
- évolutions en habileté spatiale et en modélisation 3D suite à des enseignements en école d'ingénieurs (Hamade *et al.*, 2005; Górska et Sorby, 1998, cité dans Sorby, 1999) ;
- lien entre activité dans une tâche de modélisation collective et caractéristiques individuelles (Agbanglanon, 2019).

Pour traiter la première dimension, nous souhaitons étudier le lien entre performance aux tests spatiaux et :

- variables extrinsèques : genre, filière d'origine, prévalence manuelle, nombre de langues maternelles apprises, logiciels de modélisation pratiqués, loisirs pratiqués ;
- variables intrinsèques : nombre de stratégies, combinaisons de stratégies, changement de stratégie.

Pour traiter la deuxième dimension, nous souhaitons étudier le lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et :

- variables extrinsèques : genre, filière d'origine, prévalence manuelle, nombre de langues maternelles apprises, logiciels de modélisation pratiqués, loisirs pratiqués, scores spatiaux, stratégies mobilisées dans les tests spatiaux ;
- variables intrinsèques : stratégies de modélisation.

Pour traiter la troisième dimension, nous souhaitons étudier le lien entre évolution des scores spatiaux suite aux enseignements du premier semestre et :

- variables extrinsèques : genre, filière d'origine, prévalence manuelle, nombre de langues maternelles, logiciels de modélisation pratiqués, loisirs pratiqués, enseignements ;
- variables intrinsèques : enseignements liés à la modélisation volumique, nombre de stratégies, combinaisons de stratégies, changement de stratégie, scores spatiaux.

De plus, nous souhaitons étudier le lien entre évolution en modélisation 3D suite aux enseignements du premier semestre et :

- variables extrinsèques : genre, filière d'origine, prévalence manuelle, nombre de langues maternelles, logiciels de modélisation pratiqués, loisirs pratiqués, enseignements, scores spatiaux, stratégies mobilisées dans les tests spatiaux ;
- variables intrinsèques : enseignements liés à la modélisation volumique, stratégies de modélisation.

Finalement, nous projetons de caractériser l'activité d'individus engagés dans une tâche de modélisation collective et :

- variables extrinsèques : genre, filière d'origine, prévalence manuelle, nombre de langues maternelles, logiciels de modélisation pratiqués, loisirs pratiqués, enseignements, scores spatiaux, stratégies mobilisées dans les tests spatiaux ;
- variables intrinsèques : enseignements liés à la modélisation volumique, stratégies de modélisation.

Répondre à ces questions nécessite la définition d'une méthodologie permettant de recueillir les données pertinentes pour notre recherche.

9.3 Plan de recherche

Afin de mesurer la performance spatiale, nous allons nous procurer des tests spatiaux que nous allons tester afin de sélectionner ceux qui correspondent à la classification de Tartre (1984) et qui sont adaptés à notre terrain. De plus, il s'agit de prévoir et d'expérimenter un outil de recueil des stratégies mobilisées dans les tâches présentées dans les tests spatiaux que nous aurons retenus. Nous optons pour des questionnaires ouverts concernant des questions spécifiques et des questionnaires fermés relevant de l'ensemble d'un test. Ceci nous permettra de collecter des scores de performance spatiale, des verbatim et des choix de stratégies qu'il s'agira d'encoder.

Afin de mesurer la performance en modélisation, nous devons identifier un modéleur volumique, concevoir une activité de prise en mains et une activité de modélisation. Il nous faut

aussi élaborer un dispositif d'observation de l'activité de modélisation et de son résultat. Nous choisissons d'enregistrer l'activité à l'écran et de filmer la partie supérieure du corps des sujets en activité. Cette expérimentation nous permettra de recueillir des réalisations, que nous pourrions évaluer pour déterminer des scores de performance, et des enregistrements qu'il s'agira d'encoder pour identifier des stratégies de modélisation.

En ce qui concerne les caractéristiques individuelles qui nous intéressent, nous pouvons obtenir une partie des informations auprès des services de scolarité de l'école (e.g. genre, âge). Nous devons interroger les étudiants pour connaître leur pratique de loisirs et des modeleurs volumiques ainsi que leur prévalence manuelle et le nombre de langues maternelles qu'ils ont apprises. Nous optons pour des questionnaires, que nous devrions dans un premier temps tester afin d'en vérifier la pertinence pour notre terrain. Les réponses des questionnaires pourront être regroupées en catégories si des réponses à faibles effectifs étaient obtenues.

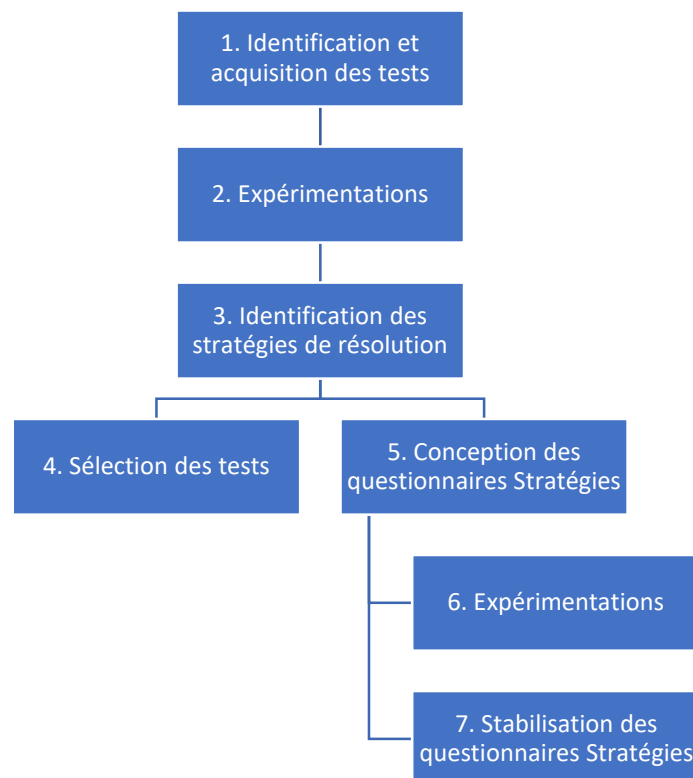
De manière à évaluer l'évolution de ces performances et des stratégies qui y sont mises en œuvre, nous devons positionner un recueil de données à l'arrivée des étudiants et un second après le premier semestre d'enseignements. Les étudiants devant exécuter un stage au mois de janvier, le second recueil doit avoir lieu au mois de décembre de manière à écarter un éventuel effet dû aux pratiques et apprentissages réalisés pendant le stage.

Finalement, nous souhaitons caractériser l'activité de groupes d'étudiants engagés dans une activité de modélisation en groupe. Nous optons pour des séances de travaux de groupe nécessitant la modélisation de pièces dans un cours de dimensionnement de mécanisme. Pour ce faire, il nous faut concevoir et tester un dispositif d'observation de l'activité d'un groupe et des individus qui le composent. Nous optons pour la captation de l'activité à l'écran des membres, du filmage de la partie supérieure du corps des individus et du filmage de l'ensemble du groupe.

Chapitre 10. Méthodologie de caractérisation de l'habileté spatiale

Pour répondre à notre question de recherche, nous avons conçu une méthodologie comprenant des mesures de performance de l'habileté spatiale et de performance de la modélisation volumique, ainsi que des outils d'observation des processus cognitifs engagés. Comme expliqué au chapitre 5, nous avons identifié dans la littérature des tests de visant à mesurer l'habileté spatiale et acquis ceux qui nous semblaient pertinents pour notre recherche. Nous les avons ensuite mobilisés dans des expérimentations afin d'observer les comportements adoptés par les sujets pour les résoudre. Ces premières observations ont révélé qu'il existe plusieurs méthodes pour traiter les tâches qui y sont présentées. Le mise en évidence de cette pluralité de stratégies de résolution nous oriente d'une part vers la sélection des tests les plus pertinents pour répondre à notre question de recherche. Elle nous mène d'autre part à investiguer ces stratégies et à développer des outils de recueil de ces processus cognitifs. Nous optons pour l'élaboration de questionnaires que nous devons tester dans de nouvelles expérimentations, puis stabiliser au vu des résultats obtenus. La figure 37 reprend l'ensemble du processus de conception de notre méthodologie de mesure de l'habileté spatiale et de caractérisation des stratégies de résolution qui est décrite dans ce chapitre.

Figure 37. Conception du protocole de mesure de l'habileté spatiale et des stratégies qui y sont mobilisées



10.1 Identification des stratégies de résolution

Les observations filmées et les entretiens de l'expérimentation A ont été encodés à partir d'indicateurs relevés dans les observations et dans la littérature :

- stratégies déclarées mobilisées : rotation mentale, transformation mentale, changement de point de vue, analyse du stimulus, extraction d'un point de repère, extraction d'une partie d'un tout ;
- gestes spontanés : le doigt suit les contours de la figure sur le stimulus, geste de la main e.g ; pivot, coupe), mouvement de la tête, mouvement du buste, réorientation du corps.

En ce qui concerne les tests visant à mesurer la visualisation spatiale, les entretiens ont montré que :

- le R PSVT:R mettait en œuvre la rotation mentale pour 90% des sujets et une combinaison de stratégies pour 10% des sujets ;
- le MRT mobilisait la rotation mentale pour 55% des sujets et une combinaison de stratégies pour 45% des sujets ;
- le MCT engageait la transformation mentale pour 46% des sujets et une combinaison de stratégies pour 54% des sujets ;
- le *Santa Barbara Solids Test* mettait en œuvre la transformation mentale pour 100% des sujets.

Concernant les tests visant à mesurer l'orientation spatiale, les entretiens ont fait ressortir que :

- le PSVT:V mobilisait le changement de point de vue pour 82% et une combinaison de stratégies pour 18% des sujets ;
- le CFT mettait en œuvre la stratégie d'isolement d'une partie d'un tout pour 23% des sujets, l'analyse du stimulus pour 46% et une combinaison de stratégies pour 31% ;
- le *Perspective Taking/Spatial Orientation Test* mobilisait le changement de point de vue pour 57% des sujets, la rotation mentale pour 14,5%, une stratégie moteur pour 7 % et une combinaison de stratégies pour 21,5% ;
- le *Visualization of Views Test* mettait en œuvre la rotation mentale pour 21,5% des sujets, le changement de point de vue pour 21,5%, la stratégie d'extraction d'une partie d'un tout pour 28,5% et une combinaison de stratégies pour 28,5% ;
- le *Hidden Figures Test* engageait la rotation mentale pour 27,5% des sujets, l'analyse du stimulus pour 27,5% , la stratégie d'isolement d'une partie d'un tout pour 9% et une combinaison de stratégies pour 36% ;
- le *Hidden Patterns Test* mobilisait une stratégie analytique pour 100% des sujets.

Ces résultats sont regroupés dans le tableau 8 :

Tableau 8. Stratégies mobilisées dans les tests expérimentés et leur distribution exprimée en pourcentages

Facteur spatial visé (Tartre, 1984)	Test	N	Stratégie mobilisée						
			Rotation mentale	Transformation mentale	Changement de point de vue	Une partie d'un tout	Analyse du stimulus	Stratégie moteur	Combinaison
Rotation mentale	R PSVT:R	20	90%						10%
	MRT	9	55%						45%
Transformation mentale	MCT	15		46%					54%
	SBST	4		100%					
Un tout réorganisé	PSVT:V	17			82%				18%
	PTSOT	14	14,5%		57%			7%	21,5%
	VVT	14	21,5%		21,5%	28,5%			28,5%
Une partie d'un tout	HFT	11	27,5%			9%	27,5%		36%
	HPT	2					100%		
	CFT	13				23%	46%		31%

Légende. N = nombre de sujets.

Ce tableau décrit le nombre de sujets, exprimé en pourcentage quand il est supérieur à 0, mobilisant une stratégie selon le test spatial expérimenté.

Ces résultats confirment que :

- le MRT mobilisent différentes stratégies de résolution (Albaret et Aubert, 1996, p. 271; Hegarty, 2018, p. 1214) ;
- les tests visant à mesurer l'orientation spatiale, dans nos expérimentations le PTSOT, le VVT et le HFT, sont susceptibles de mobiliser la rotation mentale (Barratt, 1953, p. 24; Kozhevnikov et Hegarty, 2001, p. 750; Lohman, 1979, p. 149) ;
- le MCT met en œuvre une combinaison de stratégies incluant la transformation mentale (Tsutsumi *et al.*, 2008, p. 110) ;
- il existe une variété de stratégies pour répondre aux questions d'un test spatial (Barratt, 1953, p. 23; French, 1965, p. 26; Guay, 1980, p. 3; Guay *et al.*, 1978, p. 125; Lohman, 1993, p. 5; Thurstone, 1938b, p. 8);
- certains sujets utilisent plusieurs stratégies dans un même test (P. E. Eme et Marquer, 1998, p. 466; Lohman et Kyllonen, 1983, p. 127; Moreau *et al.*, 2012, p. 87; Workman et Lee, 2004, p. 28).

D'autre part, l'encodage croisé des vidéos et des entretiens a montré que les sujets ayant recours aux gestes spontanés pour les tests de visualisation spatiale déclaraient utiliser des stratégies manipulatoires mentales telle que la rotation mentale.

Les entretiens ont par ailleurs mis à jour une différence dans l'argumentation fournie par les répondants, en particulier entre les étudiants ingénieurs et les sujets qui ne sont pas issus d'une formation scientifique : les étudiants ingénieurs s'appuient sur des règles et des démonstrations géométriques pour justifier leur raisonnement, notamment quand ils décrivent des rotations dans une base orthonormée directe, ce qui n'apparaît pas chez les étudiants de l'ILEPS, dont les explications sont moins précises.

10.2 Sélection des tests

Nous souhaitons évaluer les quatre facteurs spatiaux composant l'habileté spatiale selon le modèle de Tartre (1984). À cet effet, nous avons identifié et expérimenté plusieurs tests spatiaux visant à mesurer ces facteurs. L'expérimentation A a montré que ces tests mobilisaient une variété de stratégies. L'expérimentation B a montré qu'il existait un lien entre la performance à trois tests de visualisation spatiale et la performance à l'évaluation pour le module AMEC à ISAE-Supméca, pour laquelle les étudiants peuvent recourir à l'utilisation d'un modèleur volumique.

Les deux tests de rotation mentale que nous avons expérimentés, le R PSVT:R et le MRT, montrent un avantage en faveur du R PSVT:R pour mobiliser la rotation mentale. L'expérimentation B montre que les deux tests ont une relation significative avec la performance avec l'évaluation AMEC. Nous décidons de garder les deux tests pour notre expérimentation finale.

Les deux tests de transformation mentale de l'expérimentation A, le MCT et le SBST, montrent un avantage en faveur du SBST pour mettre en œuvre la transformation mentale. L'expérimentation B montre qu'il existe une relation significative entre la performance au MCT et la performance à l'évaluation AMEC. D'autre part, la littérature portant sur le lien entre l'habileté spatiale et la capacité à modéliser en 3D montre qu'il existe une corrélation significative entre la performance au MCT et la performance à des exercices de modélisation 3D (Sorby, 1999b, p. 4.465.5; Steinhauer, 2012, p. 47). Nous retenons le MCT pour notre étude.

Les trois tests pour mesurer un tout réorganisé utilisés dans l'expérimentation A, le PSVT:V, le PTSOT et le VVT, montrent un avantage en faveur du PSVT:V pour mobiliser la stratégie de changement de point de vue pour reconnaître un objet. Nous décidons de le choisir pour notre expérimentation finale.

Les trois tests pour mesurer une partie d'un tout de l'expérimentation A, le HPT, le HFT et le CFT, montrent un avantage en faveur du CFT pour engager la stratégie de recherche d'un élément intriqué dans un motif complexe. Le calcul des scores du HFT montre un niveau de performance très faible et celui des scores du HPT, un niveau de performance très élevé. Nous décidons d'utiliser le CFT pour notre étude.

10.3 Conception des questionnaires Stratégies

Parmi les études menées pour caractériser les compétences spatiales au travers de tests papier, certains protocoles incluent des commentaires à voix haute (Hegarty, 2018, p. 1214), l'analyse des temps de réponse et des composants présumés d'une tâche spatiale (Kyllonen *et al.*, 1981, p. 5), des questionnaires rétrospectifs ouverts (Albaret et Aubert, 1996, p. 271), des questionnaires rétrospectifs à choix multiples (Hegarty, 2018, p. 1216), l'analyse des mouvements oculaires (Pilardeau, 2008, p. 179), l'observation des zones d'activation cérébrale

par imagerie cérébrale (Hoyek *et al.*, 2010, p. 31) ou des entretiens rétrospectifs (Workman et Lee, 2004, p. 26). Ces recueils de données apportent des informations complémentaires quant aux pratiques adoptées par les sujets lors de la résolution de problèmes spatiaux. Les répondants déclarent, pour un même test, identifier des éléments saillants pour les retrouver sur une autre figure, faire tourner les objets mentalement, changer de point de vue, ou avoir recours à plusieurs stratégies à la fois (Albaret et Aubert, 1996; Guay, 1980; Hegarty, 2018; Lohman, 1993).

Comme décrit au chapitre 6, les verbalisations permettent de minimiser l'interprétation, peuvent être recueillies oralement ou à l'écrit, pendant ou après l'exécution de la tâche. Leur qualité est cependant dépendante de la capacité des sujets à exprimer fidèlement et avec clarté les processus cognitifs réellement adoptés. D'autre part, leur encodage peut refléter un biais de la part du chercheur qu'il s'agira de vérifier, et d'écarter si besoin, à l'aide d'encodeurs extérieurs. Nous choisissons d'opter pour ce mode de recueil en raison des forces et opportunités évoquées précédemment et d'interroger les étudiants à l'aide de questionnaires, qui sont faciles à administrer à un grand nombre de personnes au même moment.

À partir des entretiens rétrospectifs avec les sujets de l'expérimentation A, nous avons identifié des stratégies de résolutions que nous avons organisées en questionnaire à choix multiples (QCM). Ces questionnaires ont été testés sur les étudiants de l'ILEPS, après avoir interrogé oralement les répondants. Cette procédure a montré une différence entre les stratégies que les répondants ont spontanément décrites et celles qu'ils ont choisies dans le questionnaire. Ceci confirme que les questionnaires à questions ouvertes et les questionnaires à réponses fermées produisent différents types de réponses (Schwarz et Hippler, 1991, p. 44). Nous avons décidé d'inclure dans le protocole expérimental des questionnaires ouverts et des QCM, au risque d'obtenir des réponses contradictoires (Schwarz et Hippler, 1991, p. 45), de manière à ne pas limiter notre recueil aux stratégies rencontrées dans les expérimentations A. Les questionnaires ouverts concernent des stratégies spécifiques à des questions particulières, alors que les QCM adressent les stratégies concernant la totalité d'un test.

10.3.1 Questionnaires à choix multiples Stratégies

Les QCM proposent une liste de stratégies possibles, identifiées dans les entretiens rétrospectifs, pour résoudre les questions d'un test. À chaque test correspond une liste spécifique. Celles-ci sont présentées en Annexes 5 à 9.

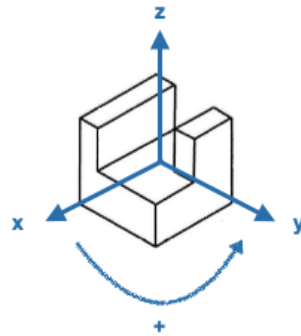
10.3.2 Questionnaires ouverts Stratégies

Pour chacun des cinq tests, trois questions ont été choisies afin d'interroger les sujets sur les stratégies qu'ils avaient adoptées pour répondre aux questions. Il était demandé de refaire mentalement chaque problème issu du test avant de décrire la stratégie adoptée de manière à recueillir le souvenir de la stratégie mobilisée le plus récent et le plus détaillé possible (i.e. la nature et l'ordre des étapes, les erreurs, les impasses) (Bloom et Broder, 1950, p. 6) et à éviter une réponse commune à toutes les questions d'un même test.

Dans le cas du R PSVT:R, il est possible de réaliser des rotations autour des axes x, y et z, comme illustré dans la figure 38, ou des rotations directes selon un axe défini par le répondant (Just et Carpenter, 1984, p. 6). Si l'on adopte la stratégie autour des axes x, y et z, on peut décrire des rotations selon la convention suivante :

- les rotations autour de l'axe z de x vers y sont positives et celles de y vers x sont négatives ;
- les rotations autour de l'axe y de z vers x sont positives et celles de x vers z sont négatives ;
- les rotations autour de l'axe x de y vers z sont positives et celles de z vers y sont négatives.

Figure 38. Repère adopté pour décrire les rotations du R PSVT:R



Légende. x = axe x ; y = axe y ; z = axe z ; + = sens positif de rotation.

Cette figure illustre la convention adoptée pour encoder les rotations autour des axes x, y et z du R PSVT:R.

Le choix des questions a été effectué à partir des expérimentations A : les questions ayant mobilisé une variété de stratégies ont été privilégiées, ainsi que celles qui pouvaient éliciter différents types de savoir : e.g. savoir théorique, savoir expérimentiel. Il a visé à présenter des questions de difficulté différente : e.g. nombre de côtés (Kyllonen *et al.*, 1981, p. 4), nature des surfaces (Pellegrino *et al.*, 1985, p. 64), amplitude et nombre de rotations (Cooper et Mumaw, 1985, p. 70; Guay, 1980, p. 10), figures ambiguës (Tartre, 1984, p. 16), illusions d'optique, nombre d'éléments composant un stimulus (Pellegrino *et al.*, 1985, p. 48), présence d'occultations (Caissie *et al.*, 2009, p. 98; Pellegrino *et al.*, 1985, p. 65). Les questions identifiées comme étant les plus difficiles ont cependant été évitées afin de maximiser le nombre de verbatim : les instructions aux étudiants étant de ne pas répondre au hasard, il était possible que les étudiants les plus faibles ne répondent pas aux questions les plus difficiles. De même, nous avons omis les questions placées en fin de test pour les tests très contraints dans le temps, c'est-à-dire le MRT et le CFT, et pour le test à difficulté croissante R PSVT:R, pour lesquelles il était plus probable que les étudiants n'aient pas le temps de répondre. Le tableau 9 reprend les caractéristiques des questions choisies pour le questionnaire ouvert Stratégies.

Tableau 9. Description des questions présentées dans le questionnaire ouvert Stratégies

Test	Question	Caractéristiques de la question
PSVT:V	11	Vue de dessous, la réponse D est une figure ambiguë qui peut être perçue de 2 manières (Tartre, 1990a, p. 16), forme contenant des surfaces planes, inclinées et non inclinées.
	18	Vue de dessous, forme contenant des surfaces planes (inclinées et non-inclinées) et cylindriques.
	16	Vue de dessus, forme contenant des surfaces obliques, les réponses A et D représentent des vues pouvant être difficiles à interpréter (impression de 2D).
R PSVT:R	7	Surfaces planes, 1 rotation sur l'axe x de -90° .
	12	Surfaces planes, inclinées ou non, 1 rotation sur l'axe y de -180° .
	13	Surfaces planes, inclinées ou non, 1 rotation sur l'axe y de -90° et 1 rotation sur l'axe x de -90° .
MRT	1	Coudes à 2-4 cubes, les distracteurs sont des reflets du stimulus.
	3	Coudes à 2-4 cubes, occultation sur la dernière proposition (Caissie <i>et al.</i> , 2009, p. 95), le coude à 2 cubes des distracteurs est sur l'axe z.
	14	Coudes à 3-4 cubes, double symétrie, les distracteurs sont des images miroir du stimulus (Caissie <i>et al.</i> , 2009, p. 95).
MCT	2	Cylindre, coupe oblique, forme qui ressemble à un objet du quotidien (baguette, tronc d'arbre), réponse qui peut être sue (la section d'un cylindre coupé par un plan oblique est une ellipse).
	6	Surfaces planes, coupe oblique, inclinées ou non, nécessité de tenir compte des mesures (Tsutsumi <i>et al.</i> , 1999, p. 116)
	15	Surfaces planes, inclinées ou non, coupe transversale, nécessité de percevoir la profondeur (Tsutsumi <i>et al.</i> , 2008, p. 116)
CFT	5	Courbes et droites
	10	Les réponses 2 et 3 peuvent être perçues comme des représentations d'objets 3D.
	26	Pavé droit, le stimulus et la réponse 1 peuvent être perçus comme des représentations d'objets 3D, la réponse est une figure ambiguë.

Ce tableau décrit les caractéristiques des items sélectionnés pour questionner les stratégies mobilisées dans la résolution des problèmes spatiaux présentés dans les tests que nous avons retenus.

10.4 Expérimentations et stabilisation des questionnaires Stratégies

Nous avons regroupé l'ensemble des tests retenus et les questionnaires Stratégies et avons invité trois étudiants d'ISAE-Supméca à venir tester la totalité du protocole visant à caractériser l'habileté spatiale : un étudiant en troisième année et deux étudiants en échange international en troisième année. Cette expérimentation a montré la faisabilité du protocole en quatre heures.

10.5 Description du terrain d'étude

Les étudiants qui intègrent ISAE-Supméca ont 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 (MP), Physique et Chimie (PC), Physique et Sciences de l'Ingénieur (PSI), Physique et Technologie (PT), Technologie et Sciences Industrielles (TSI) et Adaptation Technicien Supérieur (ATS). Les étudiants ayant suivi une classe préparatoire MP, PC, PSI et PT ont obtenu un baccalauréat scientifique, les étudiants issus de TSI un baccalauréat technologique et les étudiants issus d'ATS peuvent avoir obtenu différents baccalauréats suivant leur parcours.

Les étudiants issus des spécialisation PT, PSI et TSI ont reçu des enseignements en sciences industrielles de l'ingénieur (SII). Le portail des classes préparatoires scientifiques (<https://prepas.org/index.php>), géré et édité par l'Union des Professeurs de classes préparatoires Scientifiques, indique que les SII s'appuient sur les lois enseignées en physique pour résoudre des problèmes technologiques. L'étude des sciences industrielles de l'ingénieur varie de 4 à 8,5 heures par semaine dans ces filières, comme décrit dans le tableau 10.

Tableau 10. Volumes horaires des enseignements scientifiques et technologiques dans les filières MP, PC, PSI, PT et TSI

Filière	Mathématiques	Physique	Chimie	Sciences industrielles de l'ingénieur
MP	12	7	2	(2)
PC	9	9	5,5	-
PSI	10	7,5	2,5	4
PT	9	6	2	8,5
TSI	10	6	2	7

Légende : () indique que ces cours sont optionnels. Les volumes sont exprimés en heures.

Ce tableau décrit le nombre d'heures des disciplines mathématiques, physique, chimie et SII enseignées dans les classes préparatoires MP, PC, PSI, PT et TSI.

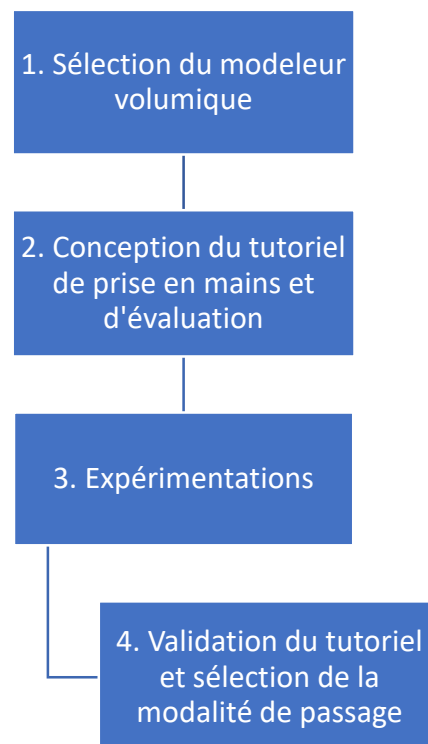
Les expérimentations auprès de nos échantillons ont révélé une relative homogénéité de processus de résolution déclarés adoptés dans la résolution des tests spatiaux auprès de la population étudiants ingénieurs. Elles ont d'autre part établi une relation significative entre des tests spatiaux visant à mesurer la visualisation spatiale et la performance dans les évaluations de certains enseignements.

Nous retenons comme terrain d'étude la population d'étudiants ingénieurs de première année d'ISAE-Supméca, c'est-à-dire des étudiants qui n'ont pas encore tous reçu des enseignements de technologie et de CAO, afin d'investiguer le lien entre formation et performance en habileté spatiale.

Chapitre 11. Construction de la méthodologie de caractérisation de la modélisation volumique

Afin de définir une expérimentation visant à caractériser l'activité déployée dans une tâche de modélisation et le produit qui en résulte, nous avons investigué les modeleurs volumiques disponibles sur différents supports et de prise en mains rapide pour des novices. Une fois le modeleur 3D choisi, nous avons conçu un tutoriel de prise en mains et un exercice de modélisation 3D à la portée de novices. Nous les avons ensuite mis à l'épreuve dans des expérimentations déclinées sur différents supports auprès de sujets volontaires. Les retours que nous y avons recueillis nous ont permis de valider le tutoriel et l'exercice de modélisation et de sélectionner le support le plus pertinent pour notre étude. Ce processus est illustré dans la figure 39 et est décrit dans ce chapitre.

Figure 39. Conception du protocole de mesure de la modélisation 3D et des stratégies qui y sont mobilisées



11.1 Expérimentation MV1

11.1.1 Sélection du modeleur volumique

Afin d'étudier la performance en modélisation volumique, nous nous sommes posée la question du choix du modeleur volumique approprié pour notre étude. Le modeleur volumique hébergé sur la plateforme 3DEXPERIENCE (Dassault Systèmes, 2012a), fournie par le partenaire industriel d'EXAAP_3D Dassault Systèmes, est le logiciel CATIA (Dassault Systèmes, 2012b). Sa prise en mains est considérée comme lourde ou peu intuitive par les professeurs d'ISAE-Supméca qui l'enseignent. Nous avons décidé d'investiguer les outils de modélisation 3D qui pourraient être rapidement pris en main par des novices.

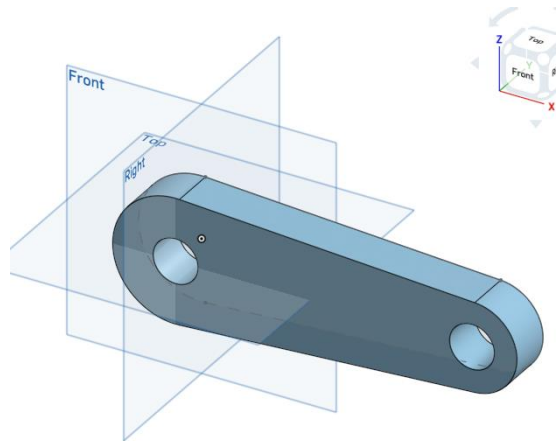
Afin de nous libérer de contraintes d'installation sur postes informatiques dans des salles dédiées, nous avons dans un premier temps investigué les modeleurs volumiques disponibles sur tablette. Nos recherches nous ont permis d'identifier SketchUp (Schell et Esch, 2000) et Onshape (Hirschtick *et al.*, 2014). Le premier logiciel permet la création directe d'objets dans un repère en trois dimensions et repose sur le principe de l'inférence, selon lequel le logiciel devine l'intention du concepteur. Il est utilisé dans certains collèges partenaires d'EXAPP_3D. Onshape est un modeleur volumique conventionnel, dans lequel le passage par le dessin d'une esquisse dans un plan de référence en deux dimensions est nécessaire avant de lui appliquer des fonctions pour générer une troisième dimension. C'est une plateforme de conception en ligne, en langue anglaise au moment de notre expérimentation. Elle offre une version *Education* gratuite qui permet à un tuteur de créer des équipes avec ses apprenants : les membres des équipes peuvent partager leurs réalisations, donnant alors un accès direct au tuteur pendant un an. Au-delà de cette date, le profil *Education* doit être réactivé. Cet accès dématérialisé et la similarité d'Onshape avec les modeleurs industriels, auxquels les étudiants vont être confrontés pendant leur formation à ISAE-Supméca, nous ont décidée vers ce choix. Nos échanges avec les enseignants d'ISAE-Supméca et des établissements partenaires d'EXAPP_3D nous avaient par ailleurs appris que cet outil n'était pas utilisé dans leurs institutions respectives. La probabilité que cet outil soit utilisé à des fins d'enseignement et que les sujets de notre étude l'aient déjà pratiqué était peu élevée.

11.1.2 Conception du tutoriel de prise en mains

Nous avons conçu un exercice de prise en mains, illustré dans la figure 40, adapté et traduit de la formation en ligne de la plateforme Onshape. Ce pas-à-pas détaille une liste d'étapes possibles pour réaliser un objet 3D comprenant deux perçages. Les manipulations incluses concernent la manipulation propre à Onshape et des actions de création d'un objet 3D :

- manipulation d'Onshape :
 - création d'une esquisse puis du choix du plan ;
 - validation de l'esquisse ;
 - création d'une extrusion et sélection de la surface à extruder ;
 - mention des zones d'affectation de la profondeur et de l'orientation de l'extrusion ;
 - validation de l'extrusion ;
 - pivotement de la figure dans le but de visualiser la pièce en 3D ;
 - suppression d'un élément ;
 - annulation de l'action précédente ;
 - ouverture d'une esquisse précédemment validée ;
- création d'un objet 3D
 - création de cercles ;
 - création de segments ;
 - contraintes géométriques : alignement horizontal, tangence, concentricité ;
 - rognage d'éléments ;
 - dimensionnement de rayons et de la distance entre deux points.

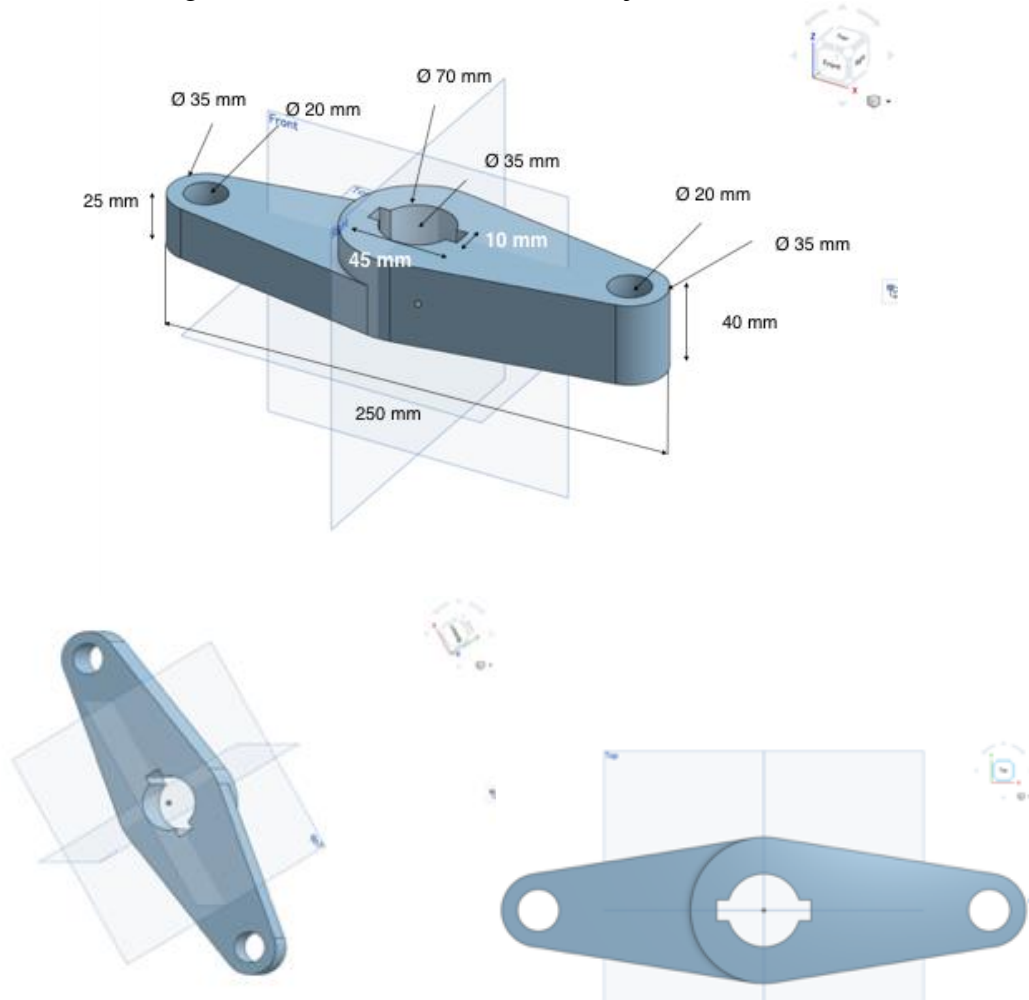
Figure 40. Objet modélisé à l'issue de l'exercice de prise en mains



Cette figure représente la pièce à mobiliser dans l'a prise en mains d'Onshape.

Ces étapes sont suffisantes pour modéliser l'objet présenté dans l'exercice de modélisation, décrit dans la figure 41, issu de la formation en ligne de la plateforme Onshape. Cet objet est plus complexe que le premier parce qu'il présente deux parties de hauteurs différentes et contient trois perçages dont un avec deux rainures de clavette. De manière à représenter l'objet à modéliser, nous présentons trois vues de l'objet : les contraintes géométriques qui le définissent n'y sont pas explicitement indiquées. En revanche, les cotes sont précisées dans la vue 3D en perspective. La compréhension de la pièce et des contraintes géométriques est à construire par les étudiants à partir de trois vues. Nous avons choisi de ne pas utiliser des vues projetées, traditionnellement utilisées dans le dessin industriel qui nécessitent une formation (Rynne et Gaughran, 2007, p. 65).

Figure 41. Vues données de l'objet à modéliser



Ces figures illustrent la pièce à réaliser dans l'exercice d'évaluation de la capacité à modéliser de notre expérimentation. La première vue est cotée et la dernière est une vue de dessus.

11.1.3 Modalité d'observation de l'activité

La captation de l'activité à l'écran permet d'observer la manifestation de l'activité de modélisation à l'écran et le dispositif de recueil est relativement discret : le sujet doit déclencher et arrêter l'enregistrement mais la présence du dispositif n'est pas manifeste pendant l'enregistrement. Elle ne fournit en revanche aucune information sur la manipulation du clavier, la direction du regard et l'activité du sujet en l'absence d'activité à l'écran. Ces informations peuvent être observées en complétant la captation d'un filmage de la partie supérieure du corps de l'utilisateur. Leur qualité est cependant dépendante de la qualité de l'enregistrement qui peut rencontrer des problèmes techniques (e.g. problème d'enregistrement du fichier à la fin de la captation). D'autre part, leur encodage peut refléter un biais de la part du chercheur qu'il s'agira de vérifier, et d'écarter si besoin, à l'aide d'encodeurs extérieurs. Nous choisissons donc d'opter pour la captation de la modélisation et de la compléter d'un enregistrement vidéo de la partie supérieure du corps des étudiants. Ces observations combinées donnent accès d'une part aux manipulations du logiciel visibles à l'écran, e.g. choix des fonctions, sélection des éléments, et aux comportements hors-écran des sujets, e.g. consultation du tutoriel, échanges avec des pairs. Pour observer cette activité, nous avons choisi le logiciel de captation Camtasia (version 2019.0.1), qui permet d'enregistrer l'activité à l'écran, ainsi que la vidéo et le son d'une

webcam branchée sur l'ordinateur sur lequel est installé le logiciel. Nous avons ensuite rédigé un tutoriel d'enregistrement de l'activité à l'écran et de la webcam.

11.1.4 Expérimentations MV1A et MV1B

Onshape étant une plateforme de développement de produits en ligne, elle est disponible sur poste informatique et tablette. Avant d'opter pour la version sur tablette, nous avons souhaité observer l'activité de sujets en situation de manipulation de la plateforme sur tablette et sur poste informatique.

Nous avons sollicité trois personnes de notre entourage pour tester nos tutoriels et notre exercice de modélisation sur tablette et sur poste informatique. De plus, quatre étudiants ingénieurs en première année de ISAE-Supméca, ayant suivi des cours de modélisation 3D, ont testé le tutoriel de prise en main d'Onshape et réalisé un exercice de modélisation 3D sur PC ($n = 2$) et sur tablette ($n = 2$). Cette distribution est décrite dans le tableau 11. Tous les sujets ont complété l'exercice en moins d'une heure.

Tableau 11. Participation des volontaires dans les expérimentations

Support	n enfant	n professionnel	n étudiant ingénieur
Tablette	2		2
Poste informatique	2	1	2

Légende. n = nombre de sujets.

Ce tableau décrit le nombre et la nature des sujets engagés dans l'expérimentation mobilisant Onshape.

L'expérience a montré que la tâche de modélisation choisie était réalisable dans un temps limité à une heure et que la prise en mains était maîtrisée plus rapidement sur support PC, que sur tablette par les étudiants ingénieurs. Selon ces derniers, les fonctions sont difficiles à localiser sur tablette car regroupées dans des menus déroulants et difficiles à sélectionner à l'aide du doigt.

L'expérimentation a d'autre part démontré l'efficacité du tutoriel d'enregistrement à l'aide de la webcam et du logiciel Camtasia.

11.1.5 Validation du tutoriel et sélection de la modalité de passage

Au vu des résultats des expérimentations, nous orientons notre choix vers le support poste informatique. Les tutoriels d'enregistrement à l'aide de Camtasia, de prise en mains d'Onshape et de l'exercice de modélisation sont aussi validés. Ils sont consultables en Annexe 10.

11.2 Expérimentation MV2

Au deuxième semestre, les étudiants participent à une série d'enseignements conçus selon l'approche pédagogique apprentissage par problème, approche mettant en œuvre des tâches de groupe de longue durée (Cosnefroy et Jézégou, 2013, p. 2). Ces cours visent à faire travailler les étudiants dans des conditions proches de la réalité industrielle, c'est-à-dire à partir de cas concrets et en travail de groupe. Les apprentissages en groupe, « nouvelles manières d'apprendre et de travailler ensemble », sont dorénavant « fortement attendues par l'économie et l'industrie » (Bellet, Vendeville et Mailles-Viard Metz, 2019, p. 994). Les étudiants œuvrent à la résolution d'un problème commun et sont libres d'organiser les tâches au sein du groupe.

Cette méthode pédagogique est particulièrement pertinente pour l'enseignement supérieur car elle confronte les étudiants à des pratiques professionnelles, sources de motivation favorables à l'intégration des acquis (Cosnefroy et Jézégou, 2013, p. 2). Le premier enseignement à aborder cette approche pédagogique s'intitule *Projet d'ingénierie mécanique – Dimensionnement (PRIM DIM)* (Peyret *et al.*, 2019). Il vise à « savoir mettre en place une méthode de dimensionnement d'un mécanisme afin de choisir ou dimensionner ses principaux composants électriques » PRIM DIM (ISAE-Supméca, 2017a). Parmi les objectifs visés par le cours, « Dimensionner un composant non-standard à l'aide d'un logiciel éléments finis » nécessite l'utilisation du modelleur volumique CATIA (version V6 2013x).

Les six premières séances démarrent par une présentation puis sont suivies par des travaux de groupes, durant lesquels les enseignants sont à la disposition des étudiants pour répondre à leurs questions. Les étudiants travaillent au dimensionnement d'un système par groupes de trois.

11.2.1 Modalité d'observation de l'activité

Nous nous intéressons à la manière dont les étudiants travaillent individuellement et collectivement dans ces séances de travail de groupe, et plus particulièrement aux échanges portant sur des problèmes de modélisation 3D. Pour ce faire, nous souhaitons enregistrer l'activité à l'écran des étudiants et les filmer de manière à recueillir des données sur leurs échanges au sein de groupe, avec des membres d'autres groupes et avec leurs enseignants. Nous retenons les mêmes modalités que pour les séances de modélisation individuelle, i.e. captation de l'écran à l'aide de Camtasia et enregistrement de la partie supérieure du corps à l'aide d'une webcam, et rajoutons une caméra filmant l'ensemble du groupe.

Les séances 6, 8 et 9 sont choisies en raison de la forte concentration de l'activité de manipulation du modelleur volumique.

11.2.2 Sélection de l'échantillon

Pour des raisons d'organisation, l'école répartit la cohorte en deux demi-promotions. Nous optons pour un échantillon de quatre équipes par demi-promotion, soit vingt-quatre étudiants. Les groupes sont sélectionnés quand ils réunissent trois membres ayant participé à l'ensemble des expérimentations des recueils 1 et 2 et pour lesquels la totalité des données est disponible. Pour l'une des demi-promotions, seuls quatre équipes respectent l'ensemble des critères de sélection et sont automatiquement retenus. Pour l'autre, treize équipes respectent l'ensemble des critères de sélection. Huit équipes sont sélectionnées selon les éléments suivants :

- origine académique ;
- prévalence manuelle ;
- représentation des genres au sein du groupe.

Les équipes retenues présentent les caractéristiques décrites dans le tableau 12 :

Tableau 12. Description des équipes

Nom de l'équipe	Genre	Prévalence manuelle	Origine académique
Carré	3 hommes	3 droitiers	1 TSI, 1 PSI et 1 PT
Cercle	3 hommes	3 droitiers	2 PSI et 1 MP
Triangle	3 hommes	2 gauchers et 1 ambidextre	1 PSI, 1 AST et 1 PC
Pentagone	2 hommes et 1 femme	2 droitiers et 1 gauchère	1 PC, 1 MP et 1 PSI
Trapèze	3 hommes	3 droitiers	2 PSI et 1 MP
Pacman	2 femmes et 1 homme	3 droitiers	2 PSI et 1 PC
Cylindre	3 hommes	3 droitiers	1 MP, 1 PT, 1 PC
Cube	3 femmes	2 droitrières et 1 ambidextre	1 MP, 1 PSI et 1 PC

Ce tableau décrit les caractéristiques des huit équipes choisies pour l'expérimentation MV2 selon le genre, la prévalence manuelle et l'origine académique.

11.2.3 Validation du protocole expérimental

Une séance de répétition générale est organisée lors de la séance 5 pour tester le protocole expérimental et identifier les éventuels problèmes. Cet essai permet de valider à la fois le choix du matériel et sa fiabilité et les documents nécessaires à l'enregistrement.

Chapitre 12. Méthodologie de collecte des données extrinsèques

De manière à caractériser les différences individuelles des étudiants constituant notre échantillon, nous avons recueilli dans un questionnaire des informations relatives à leur pratique de loisirs, leur pratique de logiciels de modélisation et leur prévalence manuelle. Nous avons d'autre part collecté des informations sociodémographiques auprès des services de scolarité, des informations concernant la performance académique des étudiants auprès des responsables de cours et des indications sur le niveau d'anglais des étudiants auprès de la responsable du département des langues.

Ce chapitre décrit la méthodologie que nous avons définie pour recueillir les caractéristiques individuelles antérieures à nos expérimentations de nos sujets.

12.1 Questionnaire Loisirs

12.1.1 Identification des loisirs

La littérature dédiée à l'habileté spatiale, décrite dans le chapitre 2, suggère que l'habileté spatiale n'est pas innée mais développée notamment de manière informelle, grâce à la pratique de certaines activités dont les pratiques ludiques (Feng *et al.*, 2007; Gold *et al.*, 2018). Nous souhaitons investiguer si certaines pratiques extra-scolaires de nos répondants sont en lien avec leur performance spatiale.

12.1.2 Choix des temporalités

Pour déterminer la liste des loisirs susceptibles d'être en lien avec la performance aux tests spatiaux, nous nous sommes appuyés sur la littérature, pour établir un premier inventaire : jeux vidéo d'action (Feng *et al.*, 2007, p. 853; Gold *et al.*, 2018, p. 10), jeux de construction (Gold *et al.*, 2018, p. 10; Górska *et al.*, 1998, p. 13), puzzles (Reilly *et al.*, 2017, p. 22), jeux pratiqués par de jeunes enfants (Caldera *et al.*, 1999, p. 859) et sport (Moreau *et al.*, 2012, p. 86). Nous avons enrichi cette liste avec les loisirs pratiqués par nos sujets des expérimentations A et B.

Nous avons défini deux temporalités pour identifier les pratiques ludiques et sportives pratiquées par les répondants :

- l'enfance et l'adolescence ;
- l'âge actuel.

La malléabilité de l'habileté spatiale à tout âge ayant été établie (Uttal *et al.*, 2013), nous avons opté pour ces deux temporalités de manière à ne pas écarter de loisirs qui pourraient avoir contribué au développement des compétences spatiales de nos sujets : loisirs pratiqués dans l'enfance puis abandonnés à l'âge adulte et de loisirs adoptés à l'âge adulte. Les réponses sont à indiquer sur une échelle de Likert (1932) en 5 points, visant à évaluer la fréquence des pratiques selon la graduation suivante : jamais, quelques fois par an, tous les mois, toutes les semaines, tous les jours. Cette échelle vise établir s'il existe une différence due à une éventuelle influence d'un loisir entre une pratique régulière et une pratique irrégulière d'un loisir (Gold *et al.*, 2018, p. 13).

12.1.3 Ajout des variables prévalence manuelle et logiciels de modélisation pratiqués

Comme décrit chapitre 2, des études ont montré une relation entre l'habileté spatiale et la prévalence manuelle (Guay et McDaniel, 1978; Somers *et al.*, 2015). De même, des études ont montré un lien entre l'apprentissage de la modélisation volumique et l'habileté spatiale (Górska, 2005; Martín-Dorta *et al.*, 2008; Sorby, 1999a).

Nous ajoutons aux questionnaires Loisirs deux items concernant la prévalence manuelle et les logiciels de modélisation utilisés par les étudiants avant leur entrée en études d'ingénieurs de niveau Licence 3 à Master 2. Les réponses sont limitées aux choix que nous avons proposés :

- pour la prévalence manuelle : gaucher, droitier, ambidextre ;
- pour les logiciels de modélisation précédemment utilisés : SolidWorks, CATIA, SketchUp, autre, aucun.

12.1.4 Expérimentations et validation des questionnaires

Le premier questionnaire, qui vise la temporalité enfance et adolescence, a été construit à partir de la liste de Caldera *et al.* (1999, p. 859), que nous avons adaptée pour qu'elle puisse être utilisée avec des enfants et des adolescents. Elle a ensuite été testée par trois enfants de sexe masculin, âgés entre 9 et 11 ans.

Le questionnaire a ensuite été testé et abondé par six étudiants ingénieurs ($N_F = 2$ [33,3%] femmes et $N_H = 4$ [66,6%] hommes) et quatre étudiants de l'ILEPS ($N_F = 1$ [25%] femmes et $N_H = 3$ [75%] hommes). Les enfants et les étudiants d'ISAE-Supméca ont testé la version à temporalité unique. Nous avons ensuite créé deux listes : la première regroupait les loisirs plus adaptés à l'enfance et à l'adolescence, et la seconde plus adaptée à de jeunes adultes. Les loisirs les plus fréquents ont été retenus pour constituer les questionnaires définitifs.

Dans ces expérimentations, les sujets pouvaient choisir entre cinq fréquences, auxquelles correspondant un score entre 1 et 5 :

- | | |
|-------------------------|---|
| • Presque tout le temps | 5 |
| • Souvent | 4 |
| • Quelques fois | 3 |
| • Rarement | 2 |
| • Presque jamais | 1 |

Cette échelle a ensuite été modifiée pour offrir des choix plus précis dans la version finale : jamais, quelques fois par an, tous les mois, toutes les semaines, tous les jours.

Nous reprenons dans le tableau 13 les scores totaux obtenus auprès des trois types de population.

Tableau 13. Table de fréquence des loisirs pratiqués

Loisir	Score cumulé		
	Enfants (N = 3)	Étudiants ISAE-Supméca (N = 6)	Étudiants ILEPS (N = 4)
Peinture	5	6	N/A
Dessin	7	11	5
Coloriage	3	6	N/A
Mosaïques, gommettes	3	6	N/A
Perles à souder	10	6	N/A
Pâte Fimo	3	6	N/A
Écriture d'histoires	7	8	6
Pratique de la musique	8	11	9
Chant	7	6	11
Jouer à la famille	3	6	N/A
Jouer à la marchande	3	6	N/A
Jouer à la poupée/aux figurines d'action	3	6	N/A
Playmobil	6	6	N/A
Petites voitures/petit train	6	6	N/A
Lego	11	10	7
Puzzles	7	7	6
Meccano	6	7	4
Geomag	9	6	N/A
Minecraft	9	9	4
Sims	3	8	3
Pokemon	12	11	3
Fortnite	3	10	11
Jeux vidéo de guerre	3	13	8
Jeux vidéo casse-tête	7	12	5
Lecture	13	22	14
Jeux de société	9	12	8
Vélo, trottinette	9	10	11
Foot	6	6	6
Rugby	N/A	7	9
Rollers	3	6	N/A
Pratique de la danse	6	6	7
Jeu des lignes (cour de récréation)	10	6	N/A
Tennis	6	8	5
Natation	10	6	10
Escalade	7	11	9
Youtube	8	19	15
Handspinner	5	6	N/A
Rubik's cube	5	8	7
Athlétisme	N/A	6	10
Échecs	N/A	N/A	4

Légende. N = nombre de sujets ; N/A = item non inclus dans la liste testée par ces sujets.

Les questionnaires Loisirs sont consultables en Annexe 11.

12.2 Collecte de données sociodémographiques

De précédentes études ont établi une relation significative entre habileté spatiale et genre (Cooke-Simpson et Voyer, 2007, p. 184; Maeda et Yoon, 2013, p. 87) d'une part et spécialisations d'autre part (Gold *et al.*, 2018, p. 9; Górska *et al.*, 1998, p. 13; Yoon et Min, 2016, p. 414). Pour connaître le genre et l'origine académique des étudiants, nous avons consulté les services de la Scolarité.

La littérature relative à l'habileté spatiale ne fait pas état d'un lien entre le nombre de langues maternelles et la performance à des tests spatiaux, nous décidons cependant d'investiguer cette variable extrinsèque. Nous avons sondé les étudiants oralement, lors d'un des cours de CCME, pour connaître le nombre de langues maternelles qu'ils avaient apprises.

12.3 Collecte de données relatives à la performance académique

Nous avons demandé aux responsables des modules du premier semestre de nous communiquer les scores obtenus aux évaluations individuelles du premier semestre ainsi que les sujets de ces évaluations. Nous avons obtenu les informations pour les enseignements MAPP, ALGO, AMEC, Mécanique des Solides (MSOL) et Conception Collaborative d'un Mécanisme (CCME). L'enseignement CCME contient une évaluation individuelle réalisée à l'issue de la formation de prise en mains du logiciel de modélisation CATIA (version 6) que nous avons retenue pour notre étude.

Le module MAPP aborde la théorie des distributions d'une variable réelle et la transformée de Laplace (ISAE-Supméca, 2018b). Le module AMEC, selon le catalogue des cours d'ISAE-Supméca, a pour objectif d'enseigner l'analyse « d'un mécanisme industriel pour schématiser sa cinématique, identifier les conditions technologiques de son bon fonctionnement, vérifier par calcul ses performances et proposer une méthode de fabrication de certains de ses composants » (ISAE-Supméca, 2017b). Pour l'évaluation, les étudiants ont eu accès à une maquette numérique dans la base CATIA (version 6). À partir de cette base, ils pouvaient générer différentes représentations du système, dont des coupes transversales. Le module ALGO, selon le catalogue des cours, a pour but l'acquisition « des bases rigoureuses et structurées en algorithmique et en structures de données fondamentales et à connaître les bases du langage C » (ISAE-Supméca, 2018a).

12.4 Niveau d'anglais

La plateforme de modélisation volumique que nous avons choisie est en anglais au moment de l'expérimentation. Nous décidons de relever le niveau d'anglais des étudiants afin de vérifier une éventuelle relation entre la performance à l'exercice de modélisation et le niveau d'anglais des étudiants. Nous avons consulté la responsable du département des langues vivantes pour connaître cette information : le niveau d'anglais des étudiants est évalué à leur arrivée à l'aide d'une version abrégée du *Test of English for International Communication* (TOEIC).

12.5 Synthèse des variables extrinsèques relevées

Notre méthodologie a permis de relever des variables extrinsèques suivantes :

- loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence ;
- loisirs pratiqués à l'âge adulte ;
- sexe ;
- filière d'origine ;
- nombre et nature des langues maternelles ;
- notes individuelles des enseignements MAPP, ALGO, AMEC, MSOL et CCME ;
- niveau d'anglais à l'arrivée à l'école.

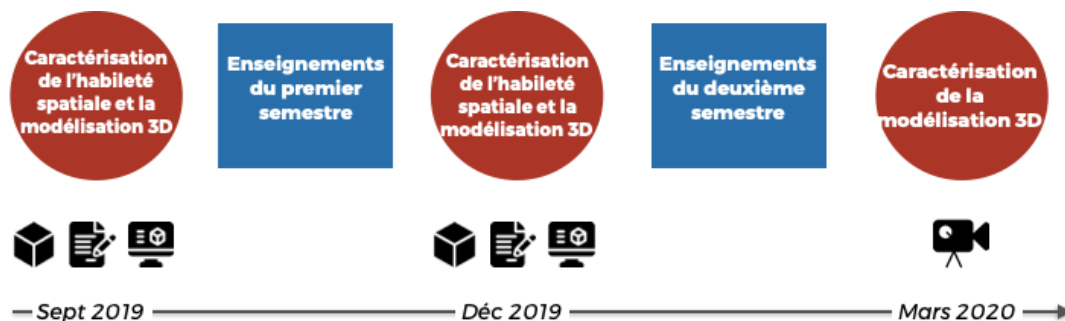
Chapitre 13. Protocole retenu et collecte des données

Pour répondre à notre question de recherche, et après avoir défini la méthodologie nous permettant d'y répondre, nous avons établi le protocole de recueil de données. Il a été déployé sur trois temporalités afin de recueillir des données à propos de :

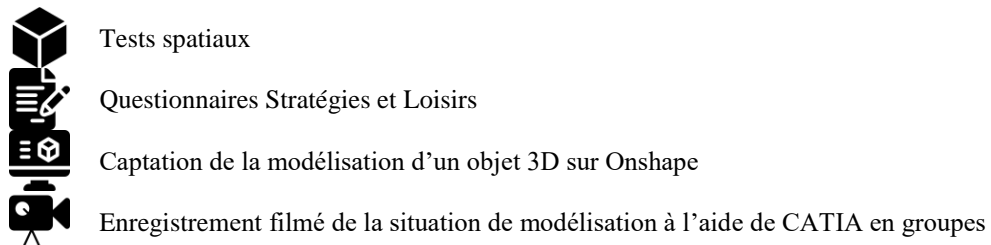
- la performance des étudiants à des tests visant à mesurer l'habileté spatiale à leur arrivée, puis après avoir suivi un semestre d'enseignements ;
- les stratégies déclarées mobilisées par les étudiants dans les tests spatiaux à leur arrivée, puis après avoir suivi un semestre d'enseignements ;
- les loisirs pratiqués durant l'enfance et l'adolescence des étudiants et à l'âge adulte ;
- la performance à un exercice individuel de modélisation volumique à leur arrivée et après avoir suivi un semestre d'enseignements ;
- les stratégies mises en œuvre dans cet exercice à leur arrivée, puis après avoir suivi un semestre d'enseignements ;
- les stratégies mobilisées dans un travail de modélisation volumique de groupe.

Le premier recueil a lieu à l'arrivée des étudiants et a été répété à la fin du semestre. Ces deux mesures ayant pour but de caractériser une éventuelle évolution de performance et de stratégies suite aux enseignements du premier semestre. Le troisième recueil a eu lieu lors d'un enseignement de modélisation 3D organisé autour du travail de groupe. Le calendrier de ces recueils est illustré dans la figure 42.

Figure 42. Calendrier du protocole expérimental



Légende :



Ce chapitre décrit le protocole déployé pour la récolte des données.

13.1 Tests spatiaux

13.1.1 Ordre de passage

Les cinq tests spatiaux utilisés sont le PSVT:V, le R PSVT:R, le MRT, le MCT, et le CFT. Les expérimentations A ont montré la possibilité et la probabilité de mobiliser une variété de stratégies dans un test spatial. La présence de tests dans une batterie se prêtant à différentes stratégies pourrait influencer les stratégies adoptées lors de la résolution des problèmes qui y sont présentés (American Psychological Association, 2022a; Kinnear et Gray, 2015, p. 241). C'est pourquoi l'ordre des tests a été choisi de manière à positionner en début de batterie les tests les plus ouverts à une variété de stratégies dans les premières expérimentations : les tests spatiaux visant à mesurer l'orientation spatiale en particulier sont sensibles au recours à la rotation mentale (Lohman et Kyllonen, 1983, p. 122). Ils ont donc été positionnés en début de batterie pour limiter l'influence des tests de visualisation spatiale. D'autre part, les tests visant à mesurer la visualisation spatiale (R PSVT:R, MRT et MCT) ont été placés de manière à diminuer le recours à une stratégie d'analyse du stimulus qui ne serait pas suivie de manipulation mentale : nos expérimentations, décrites chapitre 5, ont montré que le R PSVT:R mobilisait majoritairement la rotation mentale, alors que le MCT nécessite des stratégies de transformation mentale et analytique pour les questions dont les réponses sont à distinguer en tenant compte des mesures (Tsutsumi *et al.*, 1999). Le protocole retenu visait à favoriser la probabilité que la stratégie visée par le test soit mobilisée dans le test : c'est pourquoi nous avons placé en fin de batterie les tests mobilisant les combinaisons de stratégies et les stratégies analytiques. L'ordre retenu pour les tests spatiaux est le suivant : PSVT:V, R PSVT:R, MRT, MCT et CFT.

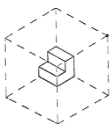
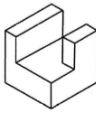



13.1.2 Modalités

Les tests que nous avons choisis reflètent l'absence d'uniformité dans la description des conditions d'administration décrite par Olson et Sabers (2008, p. 424). Les instructions du PSVT:V ne comportent pas de durée de l'épreuve : celle-ci a été déterminée selon la description du test du répertoire des tests de Eliot et Macfarlane Smith (1983, p. 382). Les instructions du R PSVT:R indiquent un temps illimité pour la durée de passation, cependant pour des raisons d'organisation, nous en avons limité le temps à une heure. D'après son auteure, les sujets qu'elle avait testés dans ses expériences, et dont le parcours académique était proche de notre terrain, complétaient le R PSVT:R en 30 minutes en moyenne (S.Y. Yoon, communication personnelle, 16 mai 2018)²². Dans l'étude présentant le MRT, Vandenberg et Kuse (1978) décrivent plusieurs durées selon différents publics. Après consultation auprès de l'auteur survivant (A.R. Kuse, communication personnelle, 25 juin 2018)²³, nous avons opté pour le temps de passation décrit dans la traduction française d'Albaret et Aubert (1996, p. 274). Les conditions d'administration décrites dans la version du MCT en notre possession ont été respectées. Les recommandations décrites dans le manuel d'administration du CFT ont été suivies (Thurstone et Jeffrey, 1965, p. 2). Il est à noter qu'à l'exception du R PSVT:R, qui est un test récent, les tests que nous avons utilisés ont été créés sous format papier et que les exemplaires que nous avons obtenus en sont des photocopies. Il n'existe pas à notre connaissance de version unique et officielle de ces tests. Finalement, nous avons traduit l'ensemble de ces tests, à l'exception du MRT traduit en français par Albaret et Aubert (1996), afin de ne pas mesurer l'aptitude en anglais des étudiants. Les modalités de passage et les spécificités des tests sont regroupées dans le tableau 14.

²² En Annexe 4.

²³ En Annexe 2.

Tableau 14. Description des tests et des compétences spatiales visées

Test	Auteur	Compétence spatiale visée	Illustration	Nombre de questions	Total des points	Notation	Durée	2D/3D
PSVT:V	Guay (1976)	Un tout réorganisé		30	30	1 point par bonne réponse	20 mn	3D
R PSVT:R	Yoon (2011)	Rotation mentale		30	30	1 point par bonne réponse	Illimité	3D
MRT	Vandenberg et Kuse (1978)	Rotation mentale		20	20	1 point pour 2 bonnes réponses, sinon 0 point	2*3mn, séparées par 3 mn de pause	3D
MCT	CEEB (1939)	Transformation mentale		25	25	1 point par bonne réponse	20 mn	3D
CFT	Thurstone et Jeffrey (1956)	Un élément issu d'un tout		49	196	1 point par bonne réponse, 1 point négatif par mauvaise réponse	10 mn	2D et 3D

Ce tableau décrit les caractéristiques des cinq tests utilisés selon la compétence visée, le nombre de questions, le total de points, le barème, la durée et le nombre de dimensions des formes représentées dans le test.

Un test supplémentaire d'orientation spatiale, le *Visualization of Views Test* (Guay, 1976b), a été placé à la suite du R PSVT:R pour occuper les étudiants qui avaient terminé le test avant la fin du temps imparti.

Les tests spatiaux ont été reliés en un document unique pour imposer un ordre de passage des tests et éviter de mélanger les feuilles. La page de garde permettait de relever les identifiants des étudiants. Une page de séparation a été insérée entre chaque test. Une gommette de couleur a été placée à l'entête de chaque test spatial, pour faciliter le repérage dans le livret. Chaque test a été positionné de manière à ce que la page de la première question se trouve sur un verso. De plus, une gommette a été placée à la fin du R PSVT:R accompagnée de la question « Quelle heure est-il ? » pour relever le temps de réponse.

Les tests ont eu lieu en amphithéâtre, en présence de la totalité des étudiants présents à la

rentrée. Les instructions orales, accompagnées d'une présentation visuelle, avaient pour but de rappeler les éléments d'organisation :

- de la séance : réponse au stylo, identifiants, respect des consignes, mise en mode silencieux des portables, instruction de ne pas deviner les réponses ;
- des tests spatiaux : durée, nombre de questions, nombre de réponses possibles, document sur lequel répondre (sujet ou feuille de réponse), rappel de l'instruction « Ne pas deviner » ;
- des questionnaires Stratégies : nombre de questions, durée, nombre de réponses, nécessité d'écrire lisiblement, document sur lequel répondre ;
- des questionnaires Loisirs : nombre de questions, durée, nombre de réponses possibles, document sur lequel répondre ;
- du formulaire de consentement : lecture et signature du document.

De manière à guider les étudiants dans le déroulé de l'épreuve et à assurer le respect des conditions d'administration, la diapositive projetée des instructions d'un test reprenait une pastille de la même couleur que celle collée sur la page d'instruction du test papier et un exemple de figure utilisée dans les stimuli. Une fois les instructions orales données, les étudiants ont lu les instructions spécifiques aux tests, eu la possibilité de poser des questions, puis le signal a été donné pour démarrer l'épreuve.

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 PSVT:V, R PSVT:R et du MCT. Dans celui du MRT, dont la limite de temps est très courte, ils ont répondu sur les énoncés puis, reporté les réponses de la partie 1 durant la pause et après avoir terminé la seconde partie de l'épreuve, pour les réponses de la partie 2. De même pour le CFT, qui est aussi très limité dans le temps, les étudiants ont répondu sur le sujet puis ont reporté leurs réponses après l'épreuve.

Les tests ont été programmés à l'arrivée des étudiants en septembre 2019 pour le recueil 1 et à la fin du premier semestre en décembre 2019 pour le recueil 2. Pour la deuxième collecte de données, les tests spatiaux ont été organisés en deux sessions, une par demi-promotion, la semaine des examens de manière à optimiser l'emploi du temps des étudiants et à garantir une meilleure participation en raison des grèves de transport et des vacances scolaires

13.2 Questionnaires Stratégies

Les QCM et les questionnaires ouverts Stratégies ont été programmés durant le même séance que les tests spatiaux. Le questionnaire ouvert a été placé avant le QCM pour ne pas être influencé par les réponses proposées dans le deuxième questionnaire. Pour les cinq tests, l'ordre était le suivant :

- questionnaire ouvert de trois questions issues du test ;
- QCM du test concerné.

Par exemple, pour le PSVT:V, il a été demandé aux étudiants d'expliquer comment ils avaient répondu aux questions 11, 18 et 16. Ensuite, il leur a été demandé de choisir une ou plusieurs réponses parmi les stratégies concernant la totalité du test proposées dans le QCM Stratégies PSVT:V.

Les réponses étaient à indiquer sur des feuilles de réponses paramétrées dans Auto Multiple Choice (Bienvenue, 2008).

Les questionnaires ont été complétés par des entretiens quand la lecture des verbatim n'a pas suffi pour comprendre les stratégies décrites par les étudiants.

Les questionnaires Stratégies ont été inclus dans le recueil 1 et le recueil 2 de manière à identifier d'éventuelles évolutions des stratégies adoptées par les étudiants après avoir suivi un semestre de cours.

13.3 Questionnaires Loisirs

Les questionnaires Loisirs ont été programmés lors de la même séance que les tests spatiaux, à la suite des questionnaires Stratégies.

Les réponses étaient à indiquer sur des feuilles de réponses paramétrées dans Auto Multiple Choice (Bienvenue, 2008).

Ces questionnaires ont été inclus dans le recueil 1 en vue d'explorer la relation entre pratique de loisirs et habileté spatiale avant le début des enseignements en école d'ingénieurs.

13.4 Formulaire de consentement

Les étudiants ont été informés du cadre, de l'objectif de l'étude, i.e. une recherche dans le cadre d'une thèse, ainsi que de son déroulé. Conformément à la Loi 2018-493 du 20 juin 2018, les répondants ont été informés de leur droit d'accès aux données recueillies durant l'expérimentation. Le formulaire a été validé par la déléguée à la protection des données d'ISAE-Supméca. Il se trouve en Annexe 12.

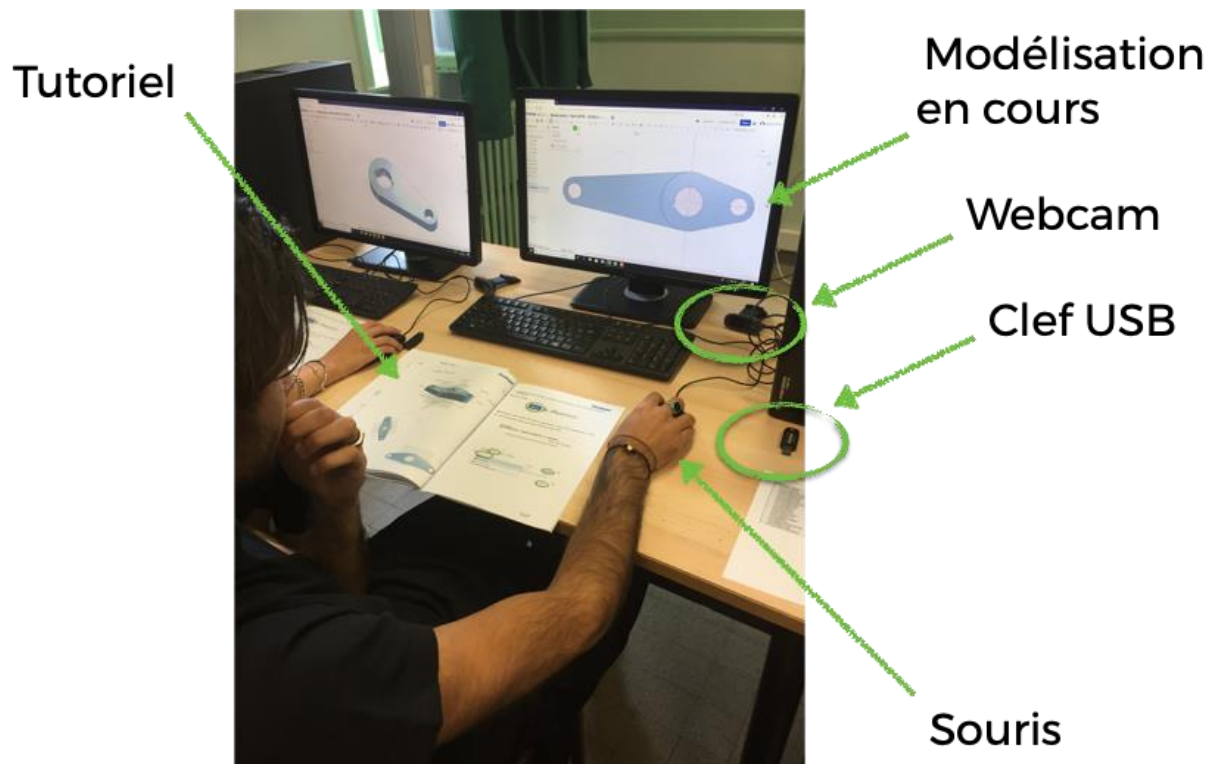
Le formulaire a été inclus lors de la séance des tests spatiaux du recueil 1 car il couvrait la totalité de la période du contrat doctoral initial.

13.5 Expérimentation d'une activité de modélisation 3D

Le tutoriel de prise en mains d'Onshape, l'exercice de modélisation et le tutoriel d'enregistrement de l'activité à l'aide du logiciel de captation Camtasia ont été regroupés dans un document unique dans cet ordre. Ce document a été imprimé sur support papier. 150 adresses mail hébergées à CY Cergy Paris Université ont été créées, puis 150 comptes Onshape *Education* ont été enregistrés à l'aide de ces adresses. Les comptes Onshape ont été regroupés en *Teams* selon les groupes définis pour l'organisation des cours de la semaine des préalables placée à l'arrivée des étudiants à l'école. Ces mêmes groupes ont été utilisés pour la planification des séances de modélisation expérimentales.

La captation de l'activité à l'écran de l'étudiant lors de la réalisation de l'exercice de modélisation sur Onshape a été réalisée à l'aide du logiciel Camtasia. De plus, la partie supérieure du corps a été filmée grâce à une webcam, qui a permis aussi la prise de son d'éventuelles conversations des étudiants avec leurs pairs ou la doctorante. La figure 43 illustre le dispositif.

Figure 43. Dispositif de captation de la séance de modélisation



Cette figure illustre les éléments du dispositif d'enregistrement de l'activité de modélisation ainsi que leur emplacement.

Une fois l'enregistrement terminé, le fichier Camatasia était à enregistrer sur les serveurs locaux dans un répertoire dédié, dont l'accès était limité aux étudiants, à la Direction des Services Informatiques, à la doctorante et à son encadrant, et sur une clef USB.

Au recueil 1, les séances de deux heures ont été planifiées selon l'emploi du temps de la semaine des préalables, préambule au démarrage des cours génériques. Les étudiants y étaient regroupés selon les groupes de la semaine des préalables, définis à partir de leur origine académique. Au recueil 2, des séances d'une heure ont été planifiées : l'emploi du temps était très chargé et nous avons considéré que la prise en mains effectuée lors du Recueil 1 serait suffisante pour ne nécessiter qu'un temps de rappel. Le même protocole et le même support papier ont été utilisés. Les étudiants qui désiraient refaire l'exercice de prise en mains de la plateforme Onshape en ont eu la possibilité. Les sujets absents au Recueil 1 ont eu le choix de suivre l'exercice de prise en mains.

13.6 Participation des étudiants

13.6.1 Recueil 1 – septembre 2019

La participation aux différentes expérimentations est décrite dans le tableau 15 : le nombre de participants pour le PSVTV1 est plus faible en raison des retards. Des séances de rattrapage de modélisation ont été organisées pour les étudiants absents aux séances qui leur étaient assignées. Un étudiant n'a pas souhaité être filmé et n'a pas participé à la séance de modélisation.

Tableau 15. Participation des étudiants

Expérimentation	Nature	<i>N</i>
Test spatiaux	PSVTV1	144 : $N_F = 27$ [18%] femmes et $N_H = 119$ [83%] hommes
	R PSVT:R1	146 : $N_F = 27$ [18%] femmes et $N_H = 122$ [83%] hommes
	MRT1	
	MCT1	
	CFT1	
Questionnaires	Stratégies	
	Loisirs	
Modélisation	Onshape	129 : $N_F = 26$ [20%] femmes et $N_H = 103$ [80%] hommes

Légende. *N* = nombre de sujets.

Ce tableau indique le nombre de participants aux différents éléments du recueil 1.

Une présentation en amphithéâtre destinée aux étudiants a été organisée après le recueil 1 pour leur décrire plus précisément les objectifs de recherche et la méthodologie associée, ainsi que pour les encourager à participer au deuxième recueil. La direction de l'école a validé la remise d'un complément au diplôme en cas de participation à toutes les expérimentations. Cette incitation a été communiquée aux étudiants lors de la présentation.

13.6.2 Recueil 2- décembre 2019

La participation aux expérimentations de décembre, illustrée tableau 16, a diminué par rapport au recueil de septembre. Elle peut être expliquée par un contexte de période d'examens, de grèves de transports, à la veille des vacances de fin d'année. Des séances de rattrapage de modélisation ont été organisées pour les étudiants absents aux séances qui leur étaient assignées. La journée de participation non-obligatoire au Recueil 2 a été accompagnée d'un buffet.

Tableau 16. Participation des étudiants au recueil 2

Expérimentation	Nature	<i>N</i>
Test spatiaux	PSVTV2	91 $N_F = 19$ [21%] femmes et $N_H = 72$ [79%] hommes
	R PSVT:R2	92 $N_F = 19$ [21%] femmes et $N_H = 73$ [79%] hommes
	MRT2	
	MCT2	
	CFT2	
Questionnaires	Stratégies	
Modélisation	Onshape	102 $N_F = 20$ [20%] femmes et $N_H = 82$ [80%] hommes

Légende. *N* = nombre de sujets.

Ce tableau indique le nombre de participants aux différents éléments du recueil 2.

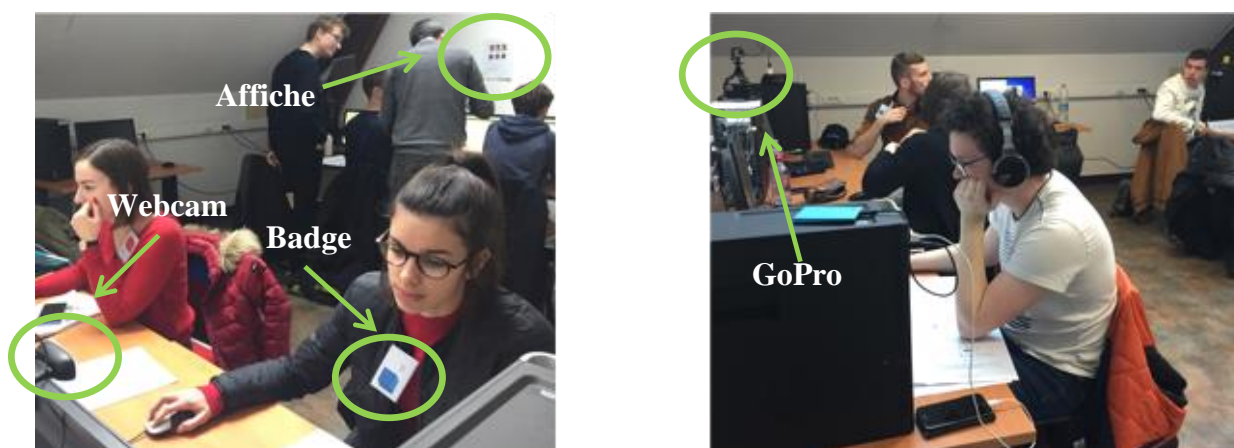
13.6.3 Recueil 3 - mars 2020

Cette expérimentation visait à recueillir le travail sur écran des étudiants et les échanges des étudiants au sein d'un même groupe, avec d'autres étudiants et avec les enseignants dans des séances de conception enseignée selon une approche pédagogique « enseignement par problème » (ISAE-Supméca, 2017).

Dans ce cours, les étudiants sont répartis dans trois salles et les professeurs se déplacent d'une salle à une autre quand ils sont sollicités par les étudiants. Les sujets sélectionnés ont été répartis dans une salle unique afin d'optimiser les prises de vue et le recueil des éventuels échanges entre groupes. La salle a été choisie car elle présente une partition qui limite la propagation des bruits de fond. Les étudiants travaillent sur trois PC alignés sur trois tables.

Pour chaque équipe, l'enregistrement de l'activité générale des étudiants a été réalisé avec une GoPro Hero White 7 par groupe. La caméra a été placée dans le coin le plus éloigné du centre de la pièce pour limiter les bruits parasites, fixée à l'un d'un support Tightgrip, positionné sur une unité centrale. L'unité centrale du PC du milieu a été placée de manière à ne pas gêner la prise de vue. Chaque caméra était reliée au secteur, via une rallonge, de manière à garantir quatre heures d'enregistrement. D'autre part, l'activité à l'écran a été enregistrée avec le logiciel Camtasia. Cet enregistrement a aussi permis d'enregistrer le son en complément de celui capté par la GoPro, grâce à une webcam sur chaque PC. Le dispositif est illustré dans la figure 44.

Figure 44. Dispositif de captation de la séance de conception collective



Cette figure illustre les éléments du dispositif d'enregistrement de l'activité de conception ainsi que leur emplacement.

Chaque étudiant a été équipé d'un badge indiquant son nom et un symbole géométrique coloré. Chaque équipe s'est vue attribuée un symbole et chaque étudiant au sein d'une équipe une couleur. Ces badges visaient à faciliter l'encodage des vidéos et à signaler aux enseignants la nécessité de se déplacer devant la caméra pour répondre aux questions de ces étudiants. Les enseignants impliqués dans les enregistrements ont signé un formulaire de consentement. Une affiche positionnée au-dessus des postes indiquait le placement des équipes. Chaque équipe avait à sa disposition une pochette contenant les badges, une fiche à cocher reprenant les actions à compléter pour garantir le recueil de données et un tutoriel d'utilisation de Camtasia. Les enregistrements ont été copiés sur un disque externe et sur un dossier partagé sur le réseau de l'école, dont l'accès était limité aux étudiants, à la DSI, à la doctorante et à son encadrant.

Le recueil prévoyait l'enregistrement des séances 6, 8 et 9, programmées les 13, 20 et 24 mars 2020. Seul l'enregistrement de la séance 6 a pu avoir lieu en raison de la crise sanitaire.

Chapitre 14. Traitement des données brutes issues des tests spatiaux et des questionnaires Stratégies

Pour caractériser l'habileté spatiale des étudiants, notre protocole comprend des éléments de mesure, i.e. les scores obtenus aux tests spatiaux, et des éléments de recueil des stratégies mobilisées dans les tests spatiaux, i.e. questionnaires Stratégies. Ce chapitre présente la méthodologie d'extraction des données issues de ces recueils.

14.1 Traitement des scores spatiaux

Ces traitements portent sur le calcul des scores et de l'évolution de la performance entre les deux prises de données.

14.1.1 Calcul des scores spatiaux

Les scores du MCT et du PSVT ont été calculés selon les instructions indiquées dans *An International Directory of Spatial Tests* (Eliot et Macfarlane Smith, 1983, p. 270 et 382) : le score est le total des réponses correctes. Il en est de même pour celui du R PSVT:R (Maeda *et al.*, 2013, p. 766). Le score du MRT a été obtenu en suivant la procédure recommandée par ses auteurs (Vandenberg et Kuse, 1978) : le répondant obtient un point à chaque question pour laquelle il a indiqué les deux réponses correctes (p. 599). Le score est obtenu en additionnant le nombre de points. Celui du CFT a été calculé d'après les instructions contenues dans le manuel accompagnant le sujet (Thurstone et Jeffrey, 1965, p. 3) : le total des réponses erronées est soustrait au total des réponses correctes.

Ces calculs sont effectués pour les deux recueils.

14.1.2 Évolution de la performance aux tests spatiaux

L'évolution de la performance aux tests spatiaux est évaluée en soustrayant le score du recueil 1 au score du recueil 2.

14.2 Encodage des questionnaires ouverts Stratégies

Ce traitement concerne l'encodage des verbatim issus des questionnaires ouverts et des alternatives choisies dans les QCM.

14.2.1 Conception de la grille d'encodage

Comme présenté au chapitre 6, plusieurs stratégies sont mobilisées dans les tests spatiaux. Nous distinguerons ici les stratégies globales, identifiées dans les études de type approche directe, des stratégies brique, identifiées dans les études d'approche inférentielle, décrites dans le chapitre 6 : les stratégies brique sont des étapes comprises dans une stratégie globale. Cette catégorisation est détaillée dans le tableau 17.

Tableau 17. Catégorisation des stratégies de résolution adoptées dans les tests spatiaux

Stratégies globales	Stratégies brique
Rotation mentale globale	Analyse du stimulus
Rotation globale à partir d'un point de repère	Comparaison
Transformation mentale	Recherche de correspondance
Isolement d'un élément intriqué	Rotation mentale
Changement de perspective	Transformation mentale
Savoir préexistant	
Renversement 180°	
Analyse du stimulus	
Extraction d'un point de repère	
Comparaison	
Vérification	

Ce tableau indique pour chaque stratégie de résolution si elle est considérée globale ou brique.

Les sujets peuvent changer de stratégies entre deux questions ou utiliser plusieurs stratégies pour répondre à une question.

Les questionnaires ouverts Stratégies reprennent trois questions par test spatial, soit quinze questions au total. Nous avons dans un premier temps procédé à la lecture des réponses de dix étudiants, ce qui nous a permis de relever des observables :

- d'action, e.g. rotation mentale ;
- de mode d'explication, e.g. dessin qui exprime la réponse ;
- de mode de réponse, e.g. réponse identique à la réponse précédente signalée par idem ;
- de séquences signalées par des marqueurs de séquencement, e.g. ensuite ;
- d'articulation de la réflexion, e.g. j'en déduis.

Une première grille d'encodage est élaborée et testée sur les réponses de dix nouveaux étudiants. Après stabilisation de la grille, elle est testée auprès de deux observateurs externes. Leur validation de la grille permet le début de l'encodage des verbatim qui est interrompu par la définition et la mise en œuvre du recueil de données 3. La reprise de l'encodage ultérieurement révèle une différence d'encodage liée à l'évolution de la revue de littérature. La grille est révisée à partir de l'encodage des réponses de douze nouveaux étudiants pour limiter le nombre d'indicateurs à 40 et accompagnée de la création d'un kit d'encodage. Le kit d'encodage est testé sur trois observateurs extérieurs et révèle des différences d'encodage importantes. La confrontation des différences avec deux observateurs révèle un manque de clarté des définitions des indicateurs et de l'objet de recherche. La grille est à nouveau révisée après avoir vérifié la distribution des indicateurs relevés. En raison de la faible mobilisation de certains indicateurs, ils sont fusionnés avec des indicateurs proches chaque fois que possible ou supprimés. Le nombre d'indicateurs est réduit à 30 et comprend 20 indicateurs d'action, deux indicateurs de mode d'explication, deux indicateurs de réponse, un indicateur de présence d'une séquence d'actions, un indicateur de difficulté exprimée pour répondre à une question, et un indicateur d'absence de réponse. Le kit d'encodage, en Annexe 13, mis à jour est testé auprès de trois observateurs externes à partir d'une sélection de réponses parmi la totalité des sujets incluant chaque indicateur de la grille d'encodage. Après confrontation des différences d'encodage relevées avec deux observateurs, un accord sur 96% pour le premier observateur et 98% pour le second est trouvé pour les 57 occurrences d'indicateurs testés dans l'encodage.

14.2.2 Encodage et traitement des verbatim issus des questionnaires ouverts Stratégies

14.2.2.1 Premier encodage

L'encodage est réalisé dans un fichier Excel, dans lequel apparaissent le numéro de l'étudiant, le nom du test, le numéro de la question. Pour chaque question, les indicateurs relevés sont reportés selon le code correspondant dans leur ordre d'apparition dans le verbatim. Les indicateurs Dessin Libre (DL), Ajout d'Information (AI), Difficulté exprimée (DIF), Réponse (REP) et Réponse Identique (RI) sont renseignés dans des colonnes dédiées car il n'est pas possible de déterminer s'ils interviennent dans la séquence de résolution de la tâche et de leur y attribuer un positionnement.

Par exemple, un étudiant a répondu en annotant le stimulus présenté dans la question, puis rédigé le reste de sa réponse. Nous encodons cette réponse comme suit :

Figure 45. Exemple d'encodage d'une réponse au questionnaire ouvert Stratégies PSVT:V



Pour moi, j'essaie de visualiser l'objet au fond du cube. Ensuite, je "tourne mentalement" le
Construction mentale du stimulus à partir de la vue présentée *Rotation mentale*

(C)

(SEQ)

(MR)

cube de verre de façon à placer le point noir devant moi. J'essaie également de visualiser la
Orientation du point de vue
(PVO)

face de l'objet sur la face arrière droite du cube flottant *.

Dans la ligne de l'étudiant concerné et dans les colonnes consacrées à la première question du PSVT:V1 sont reportés les codes suivants : C MR PVO. AI, illustré dans la figure 43, et SEQ sont reportés dans les colonnes dédiées.

Il est à noter que certains éléments de réponses peuvent donner lieu à plusieurs encodages. Par exemple, dans la réponse présentée dans la figure 46, l'étudiant a exprimé une partie de sa réponse en la dessinant.

Figure 46. Exemple de verbatim issu du questionnaire ouvert Stratégies R PSVT:R



Ce verbatim est encodé MR MR et les codes DL et SEQ sont reportés dans les colonnes dédiées.

Cette grille d'encodage est appliquée aux réponses du questionnaire pour identifier les stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux. Le nombre de stratégies différentes est calculé. Dans le cas d'un nombre de stratégies supérieur à une, les stratégies sont concaténées pour identifier les séquences de stratégies mises en œuvre dans un même test. Dans l'exemple présenté figure 44, pour l'encodage MR MR, le nombre de stratégies mobilisées est 2 et la combinaison de stratégies mises en œuvre est MRMR. De plus les indicateurs DL et SEQ sont relevés.

14.2.2.2 Deuxième encodage

La mise en séquence produit un total de 230 stratégies mobilisées possibles. Un deuxième encodage est effectué pour repérer les séquences qui décrivent des stratégies identiques même si les étudiants les ont verbalisées différemment.

Nous appuyant sur les analyses des composants d'une stratégie (Cooper et Shepard, 1973; Just et Carpenter, 1984; Lohman et Kyllonen, 1983; Pellegrino *et al.*, 1985), nous regroupons les séquences détaillées en briques sous des stratégies uniques. Nous retirons des séquences les briques de raisonnement S, D, MIM, MEMO, COR, V, S2. Par exemple, la séquence PA MR V COR, issue du MRT, qui décrit une étape de rotation MR à l'aide d'un point d'ancrage PA, une étape de vérification V en comparant la réponse obtenue aux réponses possibles COR, est ré-encodée MR, soit rotation mentale.

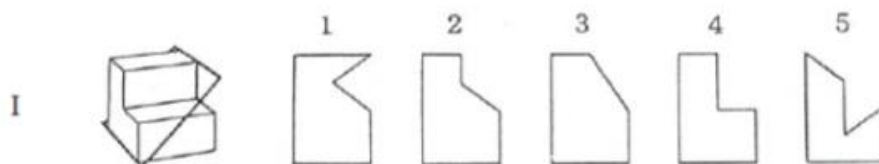
Les rotations décomposées en rotations successives sont regroupées sous la stratégie rotation mentale. Par exemple, la séquence MEMO MR MIM MR, issue du R PSVT:R, qui décrit une étape de mémorisation MEMO, une étape de rotation MR, une étape de mimétisme MIM et une étape de rotation MR est ré-encodée MR, soit rotation mentale.

Lorsque la séquence ne comporte que deux stratégies séparées par une brique de raisonnement S2 ou V, la séquence est encodée en deux stratégies. Par exemple, la séquence MR V ESE, issue du MRT, qui décrit une étape de rotation mentale MR, une étape de vérification V, et une étape d'analyse du stimulus ESE est ré-encodée MR ESE, soit rotation mentale et identification d'un élément saillant. Les séquences composées de deux stratégies sont encodées en deux stratégies : la séquence MR ESE est encodée MR ESE.

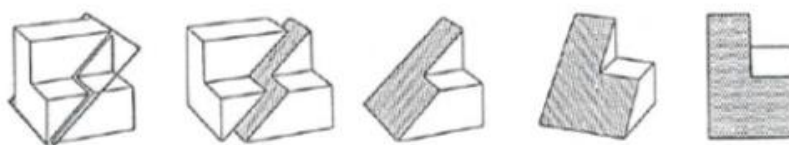
La même règle est appliquée aux transformations mentales. Pour le test de transformation mentale MCT, nous nous appuyons sur les instructions, illustrées dans la figure 47, pour construire la séquence inférée : analyse du stimulus, coupe i.e. transformation mentale, rotation mentale et comparaison.

Figure 47. Instructions du MCT traduites en français

Dans cette section, chaque problème comprend le dessin d'un objet traversé par un plan, qui indique l'endroit où l'on imagine une coupe. La réponse est la surface coupée par ce plan. Observez l'exemple I.



Ces illustrations montrent que la réponse 4 est la bonne réponse pour l'exemple I.



Ici, vous voyez l'objet coupé en 2, puis la partie à l'avant de l'objet qui est retirée. Ensuite, l'objet est pivoté pour voir la surface coupée face à soi. La réponse à trouver correspond uniquement à la surface de la partie coupée, que l'on a grisée dans le dernier dessin.

Les instructions du MCT, traduites en français, décrivent la stratégie de résolution du problème à appliquer par les sujets. Adapté de « *Special Aptitude Test in Spatial Relations* », par College Entrance Examination Board, 1939, p. 1.

Ainsi, la séquence ESE MT MR S, issue du MCT, qui décrit une étape d'analyse du stimulus ESE, une étape de transformation mentale MT, une étape de rotation mentale MR et une étape de sélection S est ré-encodée MT, soit transformation mentale.

Lorsque la séquence ne comporte que deux stratégies séparées par une brique de raisonnement S2 ou V, la séquence est encodée en deux stratégies. Par exemple, la séquence FV V ESE, issue du CFT, qui décrit une étape de recherche d'une forme complète intriquée dans un motif complexe FV, une étape de vérification V, et une étape d'analyse du stimulus ESE est ré-encodée FV ESE, soit recherche de forme et identification d'un élément saillant. Les séquences composées de deux stratégies sont encodées en deux stratégies : la séquence FV ESE est encodée FV ESE.

Une conversion supplémentaire est apportée quand les étudiants ont indiqué avoir construit mentalement l'objet stimulus, encodé C. Ceci indique qu'ils ont imaginé la pièce dans sa totalité, c'est-à-dire qu'ils l'ont imaginée à partir de plusieurs points de vue. Dans ce cas, C est ré-encodé avec PVO qui indique un changement de point de vue. Lorsque le répondant décrit avoir envisagé la pièce d'un point de vue puis d'une autre, le code PVO n'est indiqué qu'une fois.

Pour le PSVTV1, quinze combinaisons différentes sont relevées. Le tableau 18 présente, pour chaque question, la fréquence de chaque combinaison relevée. De plus, les réponses encodées FT (description d'une stratégie générique aux 3 questions) et les réponses encodées NI (réponse non-identifiée) ne sont pas tenues en compte.

Tableau 18. Table de fréquence des stratégies identifiées dans le PSVT:V1 à partir de l'encodage des verbatim Stratégies

Combinaison	Code	PSVT:V1 Réponse 1		PSVT:V1 Réponse 2		PSVT:V1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et N1	N/A	1	1	3	2	4	3
M	2	0	0	0	0	2	1
MR	3	11	8	9	6	6	4
MRPA	4	4	3	3	2	4	3
MRPVO	5	0	0	0	0	1	1
MRSVPVO	6	1	1	0	0	0	0
PVO	7	54	37	50	34	54	37
PVOM	8	0	0	0	0	4	3
PVOMR	9	13	9	5	3	2	1
PVOMRPA	10	1	1	2	1	0	0
PVOPA	11	57	39	70	48	61	42
PVOPAM	12	0	0	0	0	3	2
PVOPAMR	13	3	2	3	2	4	3
PVOPAMRPA	14	1	1	0	0	0	0
PVOSVMRPA	15	0	0	1	1	0	0
RM	16	0	0	0	0	1	1
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie ; % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les réponses des trois questions du PSVT:V1 sélectionnées.

Quinze stratégies différentes ont été relevées. Les combinaisons les plus mobilisées sont le changement de point de vue et le changement de point à l'aide d'un point de repère.

Les tables de fréquences des quatre autres tests, tableau A1, tableau A2, tableau A3 et tableau A4, se trouvent annexe.

14.2.3 Nombre et changement de stratégies

Une fois de deuxième encodage effectué, le nombre de stratégies ou séquences de stratégies mobilisées dans les trois questions issues d'un test est calculé :

- la stratégie ou la séquence de stratégies décrite pour une question compte pour une stratégie ;
- le nombre de stratégies est obtenu en additionnant le nombre de stratégies différentes comptabilisées dans les trois questions quand les étudiants ont répondu aux trois de questions. S'ils n'ont pas répondu aux trois questions, le nombre de questions n'est pas calculé. De plus, si les réponses sont encodées FT ou NI, le calcul n'est pas réalisé et l'étudiant est écarté de l'échantillon.

Le changement de stratégie, quand il a lieu entre au moins deux des trois questions, est identifié.

14.2.4 Synthèse des variables issues de l'encodage des verbatim

Pour chaque test, l'encodage produit :

- une variable indiquant la séquence de stratégies briques mises en œuvre dans le test (premier encodage) ;
- une variable indiquant la stratégie ou combinaison de stratégies uniques mobilisée dans le test (deuxième encodage) ;
- une variable indiquant le nombre de stratégies ou combinaisons de stratégies uniques mobilisées dans le test (calculé après le deuxième encodage) ;
- une variable indiquant si un changement de stratégie entre les questions d'un même test est observé (identifié après le deuxième encodage) ;
- une variable indiquant le recours au dessin pour répondre ;
- une variable indiquant le recours à un ajout d'information graphique au stimulus pour répondre ;
- une variable indiquant l'expression d'une difficulté pour répondre ;
- une variable indiquant l'expression d'une réponse à la question ;
- une variable indiquant une réponse identique à la question précédente.

14.3 Encodage et traitement des questionnaires à choix multiples Stratégies

Les questionnaires à choix multiples (QCM) Stratégies proposent une liste de stratégies de résolution spécifique à chaque test spatial. Chaque proposition a été encodée selon une stratégie spatiale d'après la littérature et nos premières expérimentations.

Le QCM Stratégies PSVT:V propose six méthodes de résolution :

1. j'ai fait tourner la proposition dans ma tête pour la mettre dans la même position que l'objet dans le " cube de verre ".
2. j'ai fait tourner l'objet dans le " cube de verre " dans ma tête pour la mettre dans la même position que la proposition.
3. je me suis mis à la place du point de vue indiqué pour observer l'objet et voir à quoi il ressemblait à partir de ce point de vue.
4. j'ai imaginé l'objet à partir du point de vue indiqué pour voir à quoi il ressemblait à partir de ce point de vue.
5. je n'ai pas changé de point de vue. J'ai identifié un élément distinctif (e.g. une arrête, un arrondi sur la forme) et je l'ai cherché sur les propositions.
6. autre.

À chaque proposition a été attribuée une stratégie de résolution issue de notre cadre théorique.

Dans le cas du PSVT:V, les propositions ont été encodées selon la grille suivante :

Tableau 19. Grille d'encodage du QCM Stratégies PSVT:V

Proposition	Stratégie de résolution	Code
1	Rotation mentale	RM
2	Rotation mentale	RM
3	Un tout réorganisé	TR
4	Un tout réorganisé	TR
5	Un tout réorganisé - Stratégie analytique	SA
6	Autre	AU

Ce tableau décrit la stratégie et le code affecté à chacune des réponses proposées pour le PSVT:V.

Cette grille d'encodage a été appliquée aux réponses du questionnaire pour identifier les stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux. Le nombre de stratégies différentes est calculé à partir du nombre de réponses choisies par l'étudiant si les réponses décrivent des stratégies différentes : si deux réponses sont encodées de la même stratégie, alors ces deux réponses comptent pour une stratégie.

Dans le cas d'un nombre de stratégies supérieur à une, les stratégies ont été concaténées pour identifier les combinaisons de stratégies mises en œuvre dans un même test. Par exemple, pour un étudiant ayant répondu réponses 2 et 3 au QCM, les réponses ont été encodées rotation mentale RM et un tout réorganisé TR, le nombre de stratégies mobilisées est 2 et la combinaison de stratégies mises en œuvre est RMTR.

Les mêmes traitements ont été appliqués aux autres tests. Les grilles d'encodage, tableau A5, tableau A6, tableau A7 et tableau A8, se trouvent en annexe.

Vingt-deux combinaisons différentes réparties sur les cinq tests sont identifiées au recueil 1, comme décrit dans le tableau 20. À chaque combinaison est affecté un code.

Tableau 20. Distribution des combinaisons de stratégies issues des QCM dans les tests spatiaux

Combinaison	Code	PSVTV1		RPSVTR1		MRT1		MCT1		CFT1	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
AU	QCMA					2	1	5	3	7	5
AUFV	QCMB									18	12
AURM	QCMC	1	1	10	7	4	3			3	2
AURMFV	QCMD									12	8
AUSA	QCME					1	1				
AUSARM	QCMF	1	1			8	6				
AUSATR	QCMG	6	4								
AUSATTRM	QCMH			1	1						
AUSB	QCFI							1	1		
AUSBTM	QCFJ							9	6		
AUTM	QCFK							5	3		
AUTR	QCML	4	3								
FV	QCMM									69	47
RM	QCMN	2	1	94	64	38	27			18	12
RMFV	QCMO									19	13
SA	QCMP	1	1			18	13				
SARM	QCMQ	6	4	29	20	71	50				
SATR	QCMR	50	34	1	1						
SATTRM	QCMS	12	8	5	3						
SB	QCMT							1	1		
SBTM	QCMU							70	48		
TM	QCMV							55	38		
TR	QCMW	45	31	1	1						
TRRM	QCMX	18	12	5	3						
Total	22	146		146		142		146		146	

Légende. *n* = nombre d'étudiants supérieur à 0 par catégorie ; % = pourcentage d'étudiants supérieur à 0 par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux.

14.3.1 Synthèse des variables issues de l'encodage des QCM

Pour chaque QCM, l'encodage produit :

- une variable indiquant la combinaison de stratégies mises en œuvre dans le test ;
- une variable indiquant le nombre de stratégies mobilisées dans le test.

Chapitre 15. Traitement des données brutes issues des questionnaires Loisirs et des données extrinsèques

Les questionnaires Loisirs interrogent les étudiants sur leur pratique de loisirs dans l'enfance et l'adolescence d'une part et à l'âge adulte d'autre part. Ils les questionnent aussi sur leur pratique de logiciels de modeleurs volumiques et leur prévalence manuelle.

Ce chapitre décrit le traitement des données issues des questionnaires Loisirs et des données extrinsèques collectées auprès des services de l'école en vue des traitements statistiques.

15.1 Encodage et traitement des questionnaires Loisirs

Les réponses aux questionnaires Loisirs, qui s'expriment selon la fréquence de pratique d'un loisir, ont été converties en scores :

- Jamais = 1 ;
- Quelque fois par an = 2 ;
- Tous les mois = 3 ;
- Toutes les semaines = 4 ;
- Tous les jours = 5.

Chaque étudiant obtient un score allant de 1 à 5 pour chaque loisir. Les fréquences tous les mois, toutes les semaines et tous les jours sont qualifiées comme régulières et les fréquences jamais et quelque fois par an comme non régulières.

15.1.1 Catégorisation des loisirs

Les loisirs sont qualifiés selon cinq dimensions : dynamique, manipulateur, de construction 3D, 2D, et artistique. Ces dimensions sont ensuite déclinées en catégories.

La dimension dynamique est répartie en trois catégories : déplacement physique (DEPP), déplacement virtuel au travers d'un artefact (DEPV) et sans déplacement (PDEP).

La dimension manipulateur est divisée en trois catégories : manipulateur réel (MR), manipulateur virtuel au travers d'un artefact (MV), non-manipulateur (PM).

La dimension 2D est déclinée en deux catégories : limité à la 2D (2D) et non-limité à la 2D (P2D).

La dimension de construction 3D est répartie en deux catégories : construction d'un objet physique en 3D (C3D) et sans construction d'un objet physique en 3D (PC3D).

La dimension artistique est déclinée en deux catégories : artistique (ART) et non-artistique (PART).

Les loisirs attribués à la temporalité enfance et adolescence portent le nom du loisir, alors que les loisirs associés à la temporalité âge actuel portent le nom du loisir suivi du chiffre 2.

Si la fréquence est régulière, c'est-à-dire si l'étudiant a coché tous les mois, toutes les semaines ou tous les jours, le loisir est encodé selon les cinq dimensions et selon une catégorie de la dimension correspondante. Par exemple, si la réponse pour athlétisme est tous les mois, le loisir athlétisme est encodé déplacement physique DEPP, manipulateur réel MR, non-limité à la 2D P2D, sans construction d'objet physique PC3D, non-artistique PART. Le tableau 21 décrit cette catégorisation des loisirs.

Tableau 21. Catégorisation des loisirs selon les dimensions dynamique, manipulative, de construction 3D, 2D, et artistique

Loisir	2D	Construction	Manipulatoire	Déplacement	Art
Athlétisme	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Athlétisme 2	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Ballon	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Ballon 2	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Chant	P2D	PC3D	PM	PDEP	ART
Chant 2	P2D	PC3D	PM	PDEP	ART
Cuisine 2	P2D	PC3D	MR	PDEP	PART
Danse	P2D	PC3D	PM	DEPP	PART
Danse 2	P2D	PC3D	PM	DEPP	PART
Dessin	2D	PC3D	MR	PDEP	ART
Dessin 2	2D	PC3D	MR	PDEP	ART
Échecs	2D	PC3D	MR	DEPV	PART
Échecs 2	2D	PC3D	MR	DEPV	PART
Écriture	P2D	PC3D	PM	PDEP	ART
Écriture 2	P2D	PC3D	PM	PDEP	ART
Escalade	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Escalade 2	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Fimo	P2D	C3D	MR	PDEP	PART
Fortnite 2	P2D	PC3D	MV	DEPV	PART
Jeux vidéo	P2D	PC3D	MV	DEPV	PART
Jeux vidéo 2	P2D	PC3D	MV	DEPV	PART
Lecture	P2D	PC3D	PM	PDEP	PART
Lecture 2	P2D	PC3D	PM	PDEP	PART
Lecture cartes	2D	PC3D	PM	PDEP	PART
Lecture Cartes 2	2D	PC3D	PM	PDEP	PART
Lego	P2D	C3D	MR	PDEP	PART
Lego 2	P2D	C3D	MR	PDEP	PART
Meccano	P2D	C3D	MR	PDEP	PART
Meccano 2	P2D	C3D	MR	PDEP	PART
Minecraft	P2D	PC3D	MV	DEPV	PART
Minecraft 2	P2D	PC3D	MV	DEPV	PART
Musique	P2D	PC3D	MR	PDEP	ART
Musique 2	P2D	PC3D	MR	PDEP	ART
Natation	P2D	PC3D	PM	DEPP	PART
Natation 2	P2D	PC3D	PM	DEPP	PART
Peinture	2D	PC3D	MR	PDEP	ART
Perles à repasser	2D	C3D	MR	PDEP	PART
Puzzles	2D	C3D	MR	PDEP	PART
Puzzles 2	2D	C3D	MR	PDEP	PART
Rubik	P2D	PC3D	MR	PDEP	PART
Rubik 2	P2D	PC3D	MR	PDEP	PART
Tennis	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Tennis 2	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Vélo	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Vélo 2	P2D	PC3D	MR	DEPP	PART
Voitures	P2D	PC3D	MR	PDEP	PART

Légende. 2 = pratiqué à l'âge adulte.

Ce tableau décrit la catégorie affectée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et à l'âge adulte pour les dimensions dynamique, manipulatoire, de construction 3D, 2D, et artistique.

15.1.2 Affectation d'un indice aux catégories

Pour chaque catégorie d'une dimension, le nombre de loisirs concernés est calculé. Par exemple, si un étudiant a répondu avoir pratiqué le vélo tous les jours, le ballon une fois par mois et le tennis toutes les semaines, le nombre de loisirs avec déplacement physique est de 3. Un indice est ensuite attribué aux catégories selon le nombre de loisirs pratiqués. Les indices indiquent un nombre de loisirs nul pour l'indice 0, modéré pour l'indice 1, et élevé pour l'indice 2. L'indice est déterminé selon la distribution de la catégorie. Par exemple, l'indice 0 est affecté aux étudiants ne pratiquant aucun loisir avec déplacement physique, l'indice 1 est affecté aux étudiants pratiquant entre un et trois loisirs avec déplacement physique et l'indice 2 est affecté aux étudiants pratiquant entre quatre et sept loisirs avec déplacement physique. Un indice est affecté à toutes les catégories de toutes les dimensions. Pour chaque loisir et pour chaque catégorie, les étudiants se voient ensuite attribué un code reprenant la catégorie et l'indice. Ce traitement est appliqué à toutes les catégories de toutes les dimensions. Le tableau 22 décrit l'affectation d'un indice aux trois catégories de la dimension dynamique.

Tableau 22. Affectation d'un indice aux catégories de la dimension dynamique

DEPP		DEPV		PDEP	
Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs
DEPP0	0	DEPV0	0	PDEP0	0
DEPP1	1-3	DEPV1	1-2	PDEP1	1-5
DEPP2	4-7	DEPV2	3	PDEP2	6-10

Ce tableau décrit le code affecté aux catégories de la dimension dynamique en fonction du nombre de loisirs pratiqués dans cette catégorie.

Les catégories dynamiques et manipulatoires sont composées de trois indices : un indice physique ou réel, un indice virtuel et un indice nul. Les indices physique et virtuel sont combinés pour créer de nouveaux indices reprenant l'association physique et virtuel spécifique à chaque étudiant, en fonction de la pondération des indices compris dans les associations, comme décrit dans le tableau 23.

Tableau 23. Combinaison des indices de la dimension dynamique

DEPPV	
Indice combiné	Indice réel et virtuel
DEPPV0A	DEPP0 + DEPV0
DEPPV0B	DEPP0 + DEPV1
DEPPV0C	DEPP0 + DEPV2
DEPPV0D	DEPV0 + DEPP1
DEPPV0E	DEPV0 + DEPP2
DEPPV1A	DEPP1 + DEPV1
DEPPV1B	DEPP1 + DEPV2
DEPPV2A	DEPP2 + DEPV1
DEPPV2B	DEPP2 + DEPV2

Ce tableau décrit l'indice combiné affecté aux catégories de la dimension dynamique après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie.

Ces indices combinés sont alors associés avec les indices nuls, pour obtenir les indices dimensionnels complets. Dans le cas des loisirs avec dimension dynamiques, on obtient les indices dimensionnels décrits dans le tableau 24.

Tableau 24. Définitions des indices dimensionnels de la dimension dynamique

Indice dimensionnel	Définition
DEPP0A	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV nul), PDEP nul
DEPP0B	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV nul), PDEP modéré
DEPP0C	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV nul), PDEP élevé
DEPP0D	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV modéré), PDEP nul
DEPP0E	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV modéré), PDEP modéré
DEPP0F	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV modéré), PDEP nul
DEPP0G	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV fort), PDEP nul
DEPP0H	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV fort), PDEP modéré
DEPP0I	DEPPV nul (DEPP nul, DEPV fort), PDEP élevé
DEPP0J	DEPPV nul (DEPP modéré, DEPV nul), PDEP nul
DEPP0K	DEPPV nul (DEPP modéré, DEPV nul), PDEP modéré
DEPP0L	DEPPV nul (DEPP modéré, DEPV nul), PDEP fort
DEPP0M	DEPPV nul (DEPP fort, DEPV nul), PDEP nul
DEPP0N	DEPPV nul (DEPP fort, DEPV nul), PDEP modéré
DEPP0O	DEPPV nul (DEPP fort, DEPV nul), PDEP fort
DEPP1A	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV modéré), PDEP nul
DEPP1B	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV modéré), PDEP modéré
DEPP1C	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV modéré), PDEP fort
DEPP1D	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV fort), PDEP nul
DEPP1E	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV fort), PDEP modéré
DEPP1F	DEPPV modéré (DEPP modéré, DEPV fort), PDEP fort
DEPP2A	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV modéré), PDEP nul
DEPP2B	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV modéré), PDEP modéré
DEPP2C	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV modéré), PDEP fort
DEPP2D	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV fort), PDEP nul
DEPP2E	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV fort), PDEP modéré
DEPP2F	DEPPV fort (DEPP fort, DEPV fort), PDEP fort

Ce tableau décrit l'indice dimensionnel affecté aux catégories de la dimension dynamique après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie et les indices d'absence de pratique.

Un indice dimensionnel est affecté aux cinq dimensions. Les définitions des dimensions se trouvent en annexe :

- indices manipulateurs : tableaux A9, A13 et A14 ;
- indices 2D : tableaux A10 et A15 ;
- indices de construction 3D : tableaux A11 et A16 ;
- indices artistiques : tableaux A12 et A17.

15.1.3 Synthèse des variables relatives aux loisirs

Le traitement du questionnaire Loisirs permet d'obtenir la variable indice dimensionnel complet qui indique pour cinq dimensions de loisirs, i.e. dynamique, manipulateur, de construction 3D, 2D, et artistique, l'indice de pratique des loisirs se rapportant à cette dimension :

- pour la temporalité enfance et adolescence ;
- pour la temporalité âge adulte.

15.2 Variables extrinsèques issues du questionnaire Loisirs

L'item sur la prévalence manuelle indique si les étudiants se définissent comme droitier, gaucher ou ambidextre. Un code est affecté à chaque type de prévalence.

Au recueil 1, 124 droitiers, 17 gauchers et 5 ambidextres ont participé aux tests spatiaux, comme décrit dans le tableau 25.

Tableau 25. Distribution des sujets en fonction de la prévalence manuelle

Prévalence manuelle	<i>n</i>	%
Droitiers	124	84,93
Gauchers	17	11,41
Ambidextres	5	3,36
Total	146	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence des prévalences manuelles pour notre échantillon au premier recueil.

L'item concernant les logiciels indique si les étudiants ont déjà utilisé un des logiciels de notre liste, la distribution est illustrée tableau 26, et permet de calculer le nombre de logiciels qu'ils ont déjà pratiqués, illustré dans le tableau 27.

Tableau 26. Distribution des pratiques de logiciels de modélisation

Logiciel	<i>n</i>	%
Solidworks	108	72
CATIA	7	5
SketchUp	66	44
Autre	27	18
Aucun	20	13

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence de pratique antérieure de logiciels pour notre échantillon au premier recueil.

Tableau 27. Distribution du nombre de logiciels de modélisation pratiqués

Nombre de logiciels	<i>n</i>	%
0 logiciel	20	13
1 logiciel	59	40
2 logiciels	53	36
3 logiciels	13	9
4 logiciels	1	1
Plus d'un logiciel	126	85

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence de pratique antérieure de logiciels en fonction du nombre de logiciels pour notre échantillon au premier recueil.

Le traitement des caractéristiques extrinsèques permet d'obtenir les variables :

- une variable prévalence manuelle ;
- une variable indiquant la pratique des logiciels proposés ;
- une variable nombre de logiciels pratiqués.

15.3 Autres variables extrinsèques

Les autres variables extrinsèques ont été recueillies auprès des services de scolarité, en interrogeant oralement les étudiants et en consultant le département des langues.

15.3.1 Genre

Au recueil 1, 119 hommes et 27 femmes ont participé aux tests spatiaux, comme décrit dans le tableau 28.

Tableau 28. Distribution des genres

Genre	<i>n</i>	%
Femmes	27	18
Hommes	119	82
Total	146	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la répartition des genres dans notre échantillon au premier recueil.

15.3.2 Filière d'origine

Les étudiants ont suivi une classe préparatoire, une licence 2 ou une licence 3, ou obtenu un brevet de technicien supérieur ou un diplôme universitaire technique. La distribution de ces spécialisations est décrite tableau 29. Les étudiants issus de classes préparatoires proviennent des spécialisations Mathématiques et Physiques (MP), Physique et Chimie (PC), Physique et Sciences de l'Ingénieur (PSI), Physique et Technologie (PT), Technologie et Sciences Industrielles (TSI) et Adaptation Technicien Supérieur (ATS).

Tableau 29. Distribution des filières d'origine

	Filière d'origine									Total
	PC	MP	L2	PSI	PT	TSI	ATS	BTS	DUT	
<i>n</i>	26	38	2	52	18	3	5	1	1	146
%	18	26	1	36	12	2	3	1	1	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence des filières d'origine.

Les étudiants issus des spécialisation PT, PSI et TSI ont reçu des enseignements en sciences industrielles de l'ingénieur comme décrit chapitre 10. Il en est de même pour les étudiants issus de filières BTS et de DUT. Les étudiants issus de PC, MP et L2 ont reçu peu ou pas d'enseignements technologiques.

Pour des raisons statistiques, nous regroupons les étudiants ayant reçu des enseignements statistiques (PSI, PT, TSI, ATS, BTS, DUT) dans une catégorie Technologique et les autres (L2, MP, PC) dans une catégorie Non-technologique, dont la distribution est décrite tableau 30.

Tableau 30. Distribution des filières d'origine selon la teneur en enseignements technologiques

	Filière technologique	Filière non-technologique	Total
<i>n</i>	80	66	146
%	55	45	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence des filières d'origine selon qu'elles contiennent des enseignements technologiques.

Au recueil 1, 80 étudiants issus de filières technologiques et 66 étudiants issus de filières non-technologiques ont participé aux tests spatiaux.

15.3.3 Nombre de langues maternelles

Les étudiants, que nous avons interrogés pendant un cours, ont déclaré avoir appris une ou deux langues maternelles dans l'enfance. Quatre personnes étaient absentes le jour du recueil. La distribution est décrite tableau 31. Lors de cette collecte d'information, nous avons identifié deux types de raison à cette caractéristique : les étudiants sont nés et ont étudié en France et ont appris deux langues maternelles par une pratique familiale et scolaire en France. Nous notons une catégorie concernant des étudiants nés et ayant étudié à l'étranger et ayant appris deux langues maternelles par une pratique familiale et scolaire à l'étranger. Nous n'avons cependant pas noté ces différences de manière systématique.

Tableau 31. Distribution du nombre de langues maternelles apprises

Nombre de langues maternelles apprises	<i>n</i>	%
1	119	82
2	23	16
Absents	4	3
Total	146	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit la fréquence du nombre de langues maternelles apprises par les étudiants.

15.3.4 Niveau d'anglais

Les scores d'anglais sont affectés aux étudiants selon leur numéro d'étudiant. Les étudiants sont regroupés par catégories de niveaux selon leur performance au TOEIC de positionnement, comme décrit dans le tableau 32. Les scores sont catégorisés comme faibles, moyens ou faibles d'après leur distribution :

- les scores inférieurs ou égaux au premier quartile sont catégorisés faibles: catégorie 3 ;
- les scores supérieurs au quartile 1 et inférieurs ou égaux au quartile 3 sont catégorisés moyens : catégorie 2 ;
- les scores supérieurs au quartile 3 sont catégorisés forts : catégorie 1.

Tableau 32. Définition des groupes de performance au TOEIC

Test	Performance faible Scores \leq Q1	Performance moyenne Q1 < scores \leq Q3	Performance élevée Q3 < Scores
TOEIC	0-51	52-72	73-95

Légende. \leq = inférieur ou égal à ; $<$ = inférieur à.

Ce tableau décrit la catégorisation des niveaux de performance en anglais en fonction des scores obtenus au TOEIC de positionnement.

15.3.5 Notes des enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO

Nous avons obtenu les notes des enseignements Mathématiques Appliquées (MAPP), Algorithmique (ALGO), Analyse de Mécanismes (AMEC), Mécanique des Solides (MSOL) et Conception Collaborative d'un Mécanisme (CCME). L'enseignement CCME contient une évaluation individuelle réalisée à l'issue de la formation de prise en mains du logiciel de modélisation CATIA (PCAT) que nous retenons pour notre étude.

Les étudiants sont regroupés par catégories de niveaux selon leur performance aux enseignements du premier semestre, comme décrit dans le tableau 33. Les scores sont catégorisés comme faibles, moyens ou faibles d'après leur distribution :

- les scores inférieurs ou égaux au premier quartile sont catégorisés faibles : catégorie 3 ;
- les scores supérieurs au quartile 1 et inférieurs ou égaux au quartile 3 sont catégorisés moyens : catégorie 2 ;
- les scores supérieurs au quartile 3 sont catégorisés forts : catégorie 1.

Tableau 33. Définition des groupes de performance aux enseignements du premier semestre

Enseignement	Performance faible Scores \leq Q1	Performance moyenne Q1 < scores \leq Q3	Performance élevée Q3 < Scores
MSOL	0-11,5	12-15,5	16-20
MAPP	0-9,5	10-14,5	15-20
PCAT	0-15,8	16-23	24-30
AMEC	0-20,75	21-53,25	53,50-58,75
ALGO	0-7	8-13	14-20

Légende. \leq = inférieur ou égal à ; < = inférieur à.

Ce tableau décrit la catégorisation des niveaux de performance en anglais en fonction des scores obtenus aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.

15.3.6 Synthèse des autres variables extrinsèques

Les autres variables extrinsèques sont :

- le genre ;
- la catégorie de filière d'origine ;
- le nombre de langues maternelles apprises ;
- le score du test de positionnement d'anglais ;
- les notes individuelles de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.

Chapitre 16. Traitement des données brutes issues des modélisations réalisées à l'aide d'Onshape

Les études portant sur les stratégies de modélisation décrites dans le chapitre 7 portent sur le nombre de caractéristiques et la performance. De manière à caractériser plus finement l'activité des étudiants engagés dans une tâche de modélisation, nous investiguons des indicateurs identifiables dans les réalisations, accessibles sur la plateforme Onshape, et dans les films produits par les captations. Ce chapitre décrit le traitement des données issues des réalisations disponibles sur la plateforme. Le traitement des vidéos est abordé dans le chapitre 17.

Les productions issues de l'exercice de modélisation sont disponibles sur la plateforme Onshape du fait que nous avons opté pour des profils *Education* et que les étudiants ont partagé leurs réalisations avec les *Teams* que nous avons créées. Ceci nous donne accès à l'arbre de construction et aux corps volumiques produits. L'arbre de construction indique le nombre de corps volumiques, le nombre d'esquisses, le nombre d'extrusions, le nombre d'esquisses erronées et le nombre d'extrusions erronées. De plus, nous pouvons générer les dessins techniques en trois vues de chacun de ces corps volumiques. Ces dessins permettent de regrouper les cotes et d'évaluer les relations géométriques et le nombre de volumes fonctionnels. Ce qui n'apparaît pas sur les dessins techniques, i.e. si les étudiants ont rogné les éléments nécessaires, est repéré en consultant directement l'esquisse dans la modélisation des étudiants. Les contraintes géométriques difficiles à vérifier sur le dessin sont vérifiées dans les esquisses quand nécessaire.

16.1 Évaluation des modélisations

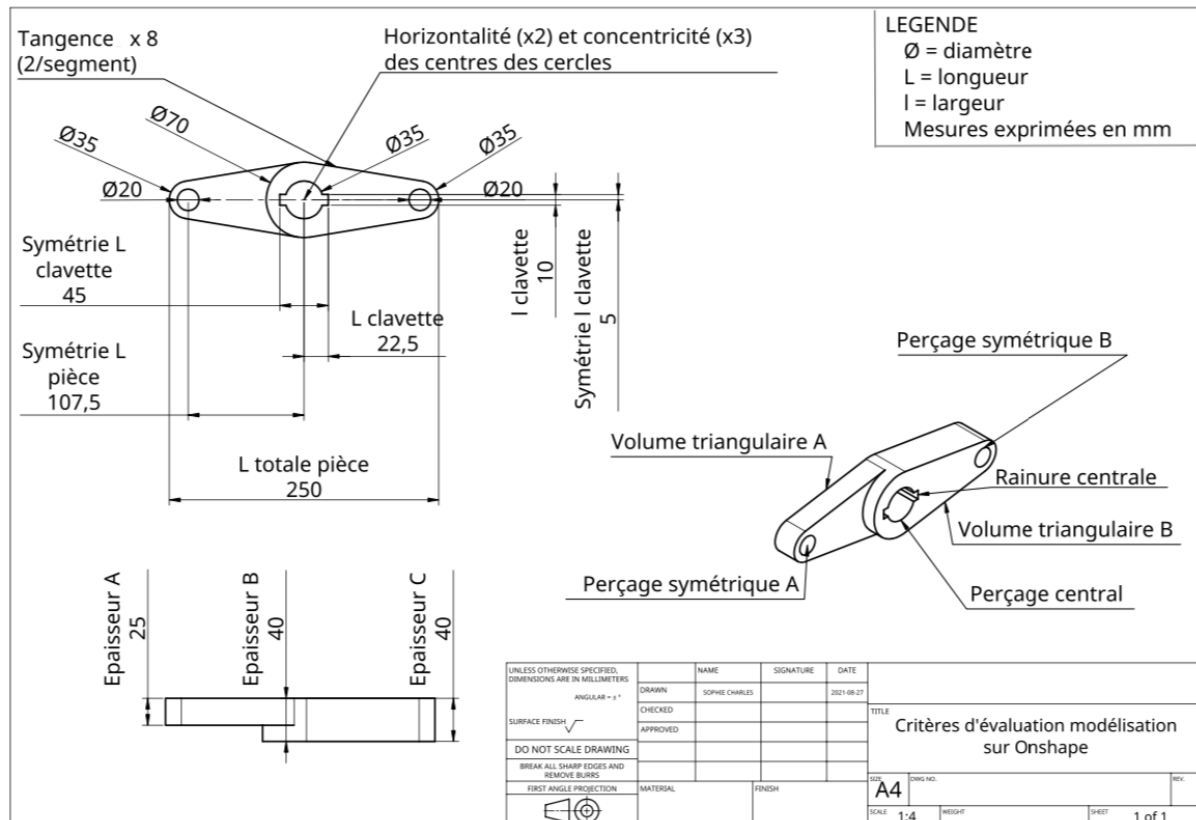
Le relevé des critères cotes, contraintes géométriques et rognage permet d'évaluer la performance des étudiants à l'exercice de modélisation. Ils sont évalués comme réussis ou non réussis et regroupés dans une évaluation dont le total est de 35 points. Le détail est décrit dans le tableau 34 et illustré dans la figure 48.

L'évaluation est réalisée à partir de trois catégories de critères :

- 12 critères dimensionnels :
 - le rayon ou diamètre des 6 cercles = 6 critères ;
 - la largeur (l) et la longueur (L) de la clavette = 2 critères ;
 - la L totale de la pièce = 1 critère ;
 - l'épaisseur des parties gauche (A), centrale (B) et droite (C) illustrées dans la figure 46 = 3 critères.
- 16 critères géométriques :
 - la concentricité des 3 cercles percés avec les 3 cercles de la pièce = 3 critères ;
 - l'horizontalité des centres des cercles Gauche-Central et Central-Droite = 2 critères ;
 - la tangence des 4 segments avec les 3 cercles de la pièce : positionnement de l'extrémité du segment avec le cercle : 2 tangences par segment = 8 critères ;
 - le centrage de la clavette : L (22,5 mm) et l (5 mm) = 2 critères ;
 - le centrage de la L totale de la pièce (107,5 mm ou 215 mm) = 1 critère.

- 7 critères fonctionnels :
 - 6 volumes élémentaires au service d'une fonction et constitutifs de la pièce à modéliser ou volumes fonctionnels : 2 volumes "triangulaires" A et B, 2 perçages symétriques A et B, 1 perçage central et 1 rainure centrale illustrés dans la figure 48 ;
 - Le rognage des éléments le nécessitant e.g. lorsque la clavette est conçue à partir d'un rectangle, l'excès est-il rogné (critère illustré dans la figure 49) ?

Figure 48. Critères d'évaluation de la modélisation



Cette figure représente graphiquement les éléments géométriques, dimensionnels et fonctionnels de la pièce qui sont évalués dans la modélisation.

Tableau 34. Barème d'évaluation de la modélisation

Catégorie	Critère	Nature	Nombre	Point	Total
Dimensionnelle	Cotes Cercles	Rayon ou diamètre	6	1	6
	Cotes Clavette	L	1	1	1
		l	1	1	1
	Cotes Pièce	L totale	1	1	1
	Cote Épaisseur volume A		1	1	1
	Cote Épaisseur volume B		1	1	1
	Cote Épaisseur volume C		1	1	1
Sous-total					12
Géométrique	Concentricité des cercles		3	1	3
	Horizontalité des cercles	Gauche/Centre	1	1	1
		Droite/Centre	1	1	1
	Symétrie	Clavette L	1	1	1
		Clavette l	1	1	1
		Pièce L totale	1	1	1
	Tangence		8	1	8
Sous-total					16
Fonctionnelle	Volumes fonctionnels		6	1	6
	Rognage			1	1
	Sous-total				
Total					35

Légende. L = longueur ; l = largeur.

Ce tableau décrit l'allocation des points pour les critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels évalués dans la modélisation.

16.1.1 Critères dimensionnels

Les contraintes dimensionnelles, ou cotes, sont des valeurs attribuées à des éléments géométriques : dans un dessin technique, une cote est un « nombre exprimant dans l'unité choisie la valeur numérique d'une longueur » (Association technique de fonderie, 1979, cité dans Office québécois de la langue française, 2012a). Elles sont indiquées dans les instructions dans une des vues de la pièce à réaliser. Certaines sont données dans cette représentation et affectables à des éléments uniques, e.g. le diamètre d'un cercle. Elles ne mobilisent pas de représentations spatiales car elles ne nécessitent pas la manipulation ou la compréhension de formes 2D ou 3D. La longueur totale de la pièce peut en revanche être obtenue de plusieurs façons : en dimensionnant la distance totale entre les extrémités des deux cercles extérieurs (illustré dans la figure 48) ou en attribuant les dimensions nécessaires aux distances constituant cette longueur totale, e.g. $L_{\text{totale}} = \text{rayon cercle extérieur gauche} + \text{distance centre cercle extérieur gauche-centre cercle central} + \text{distance centre cercle central-centre cercle extérieur droit} + \text{rayon cercle extérieur droit}$ (illustré dans la figure 49). Ce calcul est correctement réalisé lorsque les relations qui relient les différents éléments de l'objet représenté sont comprises. C'est pourquoi, une attention particulière est apportée à cette dimension : elle est considérée équivalente à une contrainte géométrique lorsque la cote de la L totale est renseignée dans le modèleur en la décomposant en plusieurs éléments.

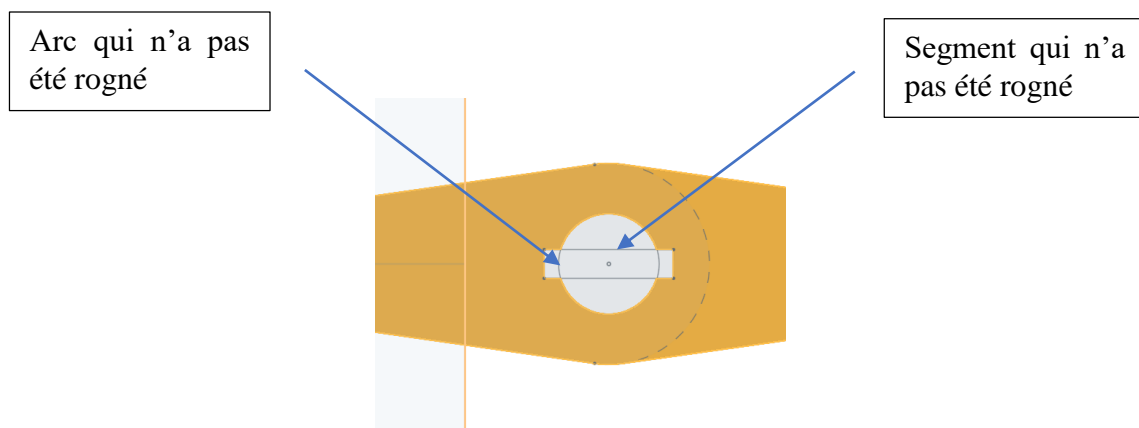
16.1.2 Critères géométriques

Les contraintes géométriques ne sont pas données explicitement aux étudiants : ils doivent inférer, à partir des représentations, les relations géométriques qui relient les éléments géométriques constituant la pièce, puis les définir grâce au logiciel. En d'autres mots, les étudiants doivent extraire les informations visuelles contenues dans les représentations 2D de l'objet à modéliser, pour les traduire en contraintes géométriques 2D dans le modèleur volumique afin de produire un objet 3D.

16.1.3 Critères fonctionnels

Finalement, les critères fonctionnels nous renseignent sur la capacité des étudiants à produire une pièce au service d'une ou plusieurs fonctions. Pour atteindre cette fonctionnalité, la pièce doit être constituée de plusieurs volumes, et être rognée quand nécessaire, de manière à respecter la forme attendue. La production de volumes fonctionnels mobilise la capacité à comprendre les relations géométriques 2D qui constituent les volumes, la capacité à décomposer ces volumes afin d'en déduire une représentation 2D pour produire l'esquisse, pour finalement transformer cette représentation 2D en un volume grâce à l'application d'un balayage, e.g. une extrusion, à la totalité ou une partie de l'esquisse. Les activités de rognage, en ce qui concerne des novices, relèvent de la rigueur à produire une esquisse conforme au modèle en supprimant tous les éléments de dessin superflus, comme on peut voir dans la clavette de la figure 49.

Figure 49. Exemple de rognage de la clavette non effectué



Note. Cette figure illustre une pièce sur laquelle les éléments superflus de la clavette n'ont pas été rognés.

16.1.4 Synthèse des variables relevées

L'évaluation de la modélisation produit des variables relatives à la performance :

- application des contraintes dimensionnelles ;
- application des contraintes géométriques ;
- nombre de volumes fonctionnels à produire ;
- application du rognage ;
- performance globale.

16.2 Évolution de la performance à l'exercice de modélisation

L'évolution de la performance à l'exercice de modélisation est évaluée en soustrayant le score du recueil 1 au score du recueil 2.

16.3 Caractérisation des stratégies de modélisation à partir des évaluations et de l'arbre de construction

L'objet à produire contient six volumes fonctionnels. Il peut être réalisé en une esquisse optimisée sur laquelle vont être appliquées deux extrusions successives selon la méthode proposée par Onshape, qui correspond à l'approche orientée caractéristique décrite dans le chapitre 7. Les enseignants d'ISAE-Supméca recommandent de créer une esquisse par volume fonctionnel et d'appliquer une fonction par esquisse, ce qui correspond à l'approche orientée objet décrite dans le chapitre 7. Cette méthode permet à des novices d'identifier facilement les esquisses nécessitant des modifications. Dans le cas de notre exercice, le nombre attendu d'esquisses et d'extrusions est de six. Un nombre d'esquisses ou d'extrusions supérieur démontre un manque d'optimisation de la modélisation et produit un arbre de construction complexe à interpréter et à modifier.

Les volumes de la pièce sont basés sur 6 cercles : 3 pour la forme générale de la pièce et 3 pour les perçages. À l'exception de la rainure de la clavette, chaque forme 2D constituant les six volumes fonctionnels de la pièce contient au moins un cercle : chaque esquisse contiendra au moins un cercle à moins de ne contenir que les éléments de construction de la rainure.

La consultation de l'arbre de construction permet de relever le nombre d'esquisses et le nombre d'extrusions finals. La consultation des esquisses permet de relever puis calculer le nombre de cercles final créés par les étudiants pour aboutir à leur réalisation.

La consultation de l'arbre de construction et des esquisses nous permet de relever les variables relatives aux stratégies de modélisation suivantes :

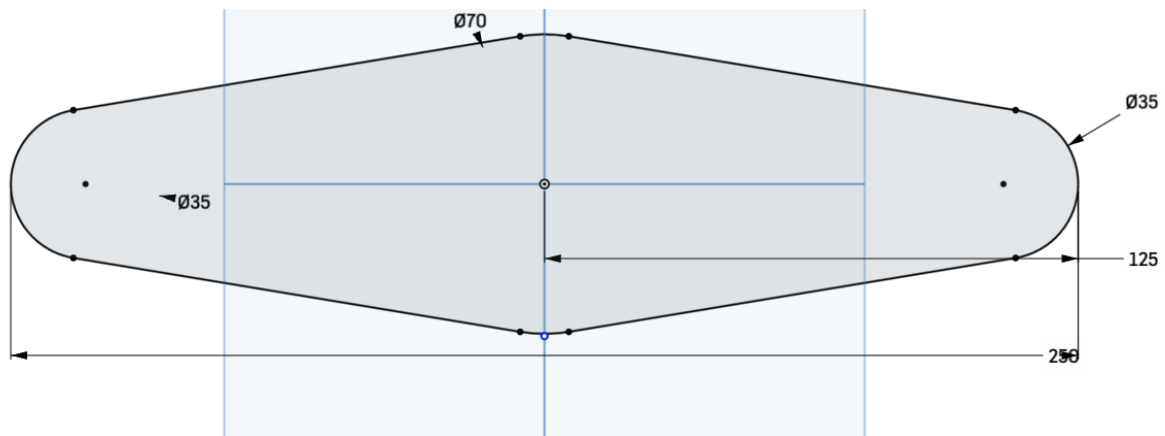
- nombre d'esquisses ;
- nombre d'extrusions, variable relevée dans les études portant sur les stratégies de modélisation décrites chapitre 7 ;
- nombre de cercles.

16.3.1 Définition de la longueur totale

La longueur totale de la pièce peut être définie de plusieurs façons. Nous observons dans les esquisses trois types de stratégies de définition de la longueur totale :

- la distance est définie entre les deux extrémités de la pièce (illustré dans la figure 50) ;
- la longueur totale est décomposée en différents éléments cotés individuellement (illustré dans la figure 51) ;
- la distance totale n'est pas définie.

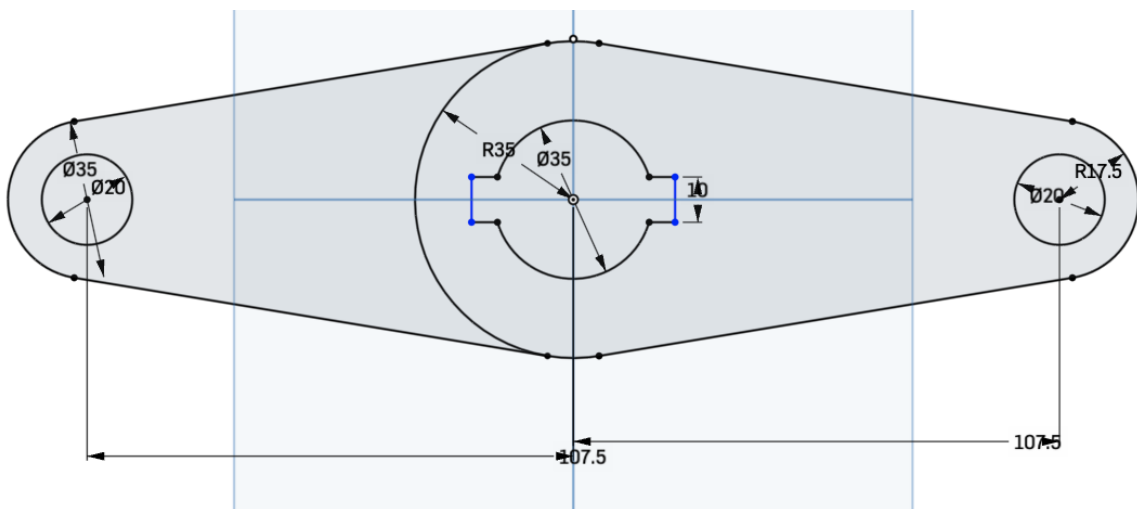
Figure 50. Exemple de longueur totale définie à partir des extrémités de la pièce



Légende. \emptyset = diamètre.

Cette figure illustre une pièce sur laquelle la distance totale de 250 mm a été définie entre les deux extrémités et la symétrie de la pièce a été déterminée en cotant une distance de 125 mm entre le centre du cercle central et l'extrémité droite de la pièce.

Figure 51. Exemple de longueur totale définie par décomposition



Légende. \emptyset = diamètre ; R = rayon.

Cette figure illustre une pièce sur laquelle la distance totale de 250 mm a été définie en cotant une distance de 107,5 mm entre le centre du cercle central et les centres des cercles extérieurs. Ce calcul tient compte des rayons des deux cercles extérieurs. La longueur totale est composée des deux rayons de 17,5 mm et des deux cotes de 107,5 mm à partir du centre du cercle central.

Outre des stratégies de définition de la longueur totale différentes, nous observons qu'elles sont adoptées avec plus ou moins de succès. Nous complétons notre première typologie avec des indicateurs de réussite de la méthode choisie :

- longueur totale décomposée correcte ;
- longueur totale décomposée incorrecte ;
- longueur totale définie à partir des extrémités correcte ;
- distance non-définie incorrecte.

En regroupant les catégories longueur totale décomposée correcte et longueur définie entre les extrémités, on obtient la catégorie des longueurs correctes. En regroupant les longueurs totales

décomposées incorrectes et les distances non-définies, on obtient la catégorie des longueurs incorrectes.

Dans l'évaluation de la modélisation, nous avons examiné si la symétrie de la pièce avait été définie, ce qui produit deux catégories :

- symétrie correcte ;
- symétrie incorrecte.

En combinant les catégories d'efficacité de la définition de la longueur totale et les catégories de réussite de la symétrie, on obtient de nouvelles catégories de stratégies de modélisation. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que la longueur totale est correcte ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes de performance quant à la définition de la symétrie, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de définition de la longueur totale. Cette typologie est décrite dans le tableau 35.

Tableau 35. Typologie de la catégorie L Totale - Symétrie

Groupe	L totale	Symétrie	Stratégie de définition de L totale
1	correcte	correcte	calculée
	correcte	correcte	distance extrémités
2	correcte	incorrecte	calculée
	correcte	incorrecte	distance extrémités
3	incorrecte	correcte	calculée
4	incorrecte	incorrecte	non définie
5	incorrecte	incorrecte	calculée

Légende. L = longueur

Ce tableau décrit la constitution des catégories L totale – symétrie à partir des stratégies de définition de la longueur totale et de la justesse de la définition de la longueur totale et de la symétrie.

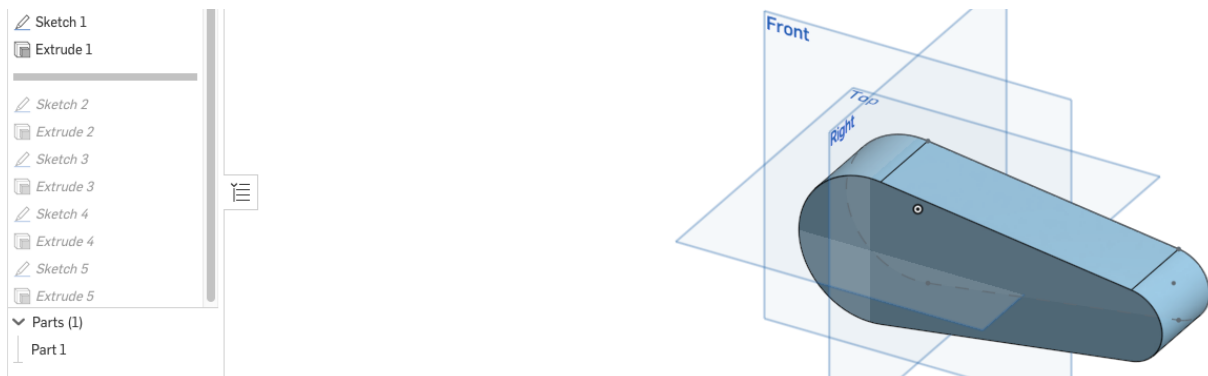
16.3.2 Perçage de la clavette

L'arbre de construction ne constitue pas un historique complet des étapes de la modélisation, par exemple parce que les esquisses et fonctions supprimées n'y sont pas apparentes. Il permet néanmoins de visualiser l'ordre des esquisses et des fonctions présentes à la fin de l'exercice et les relations qu'elles entretiennent.

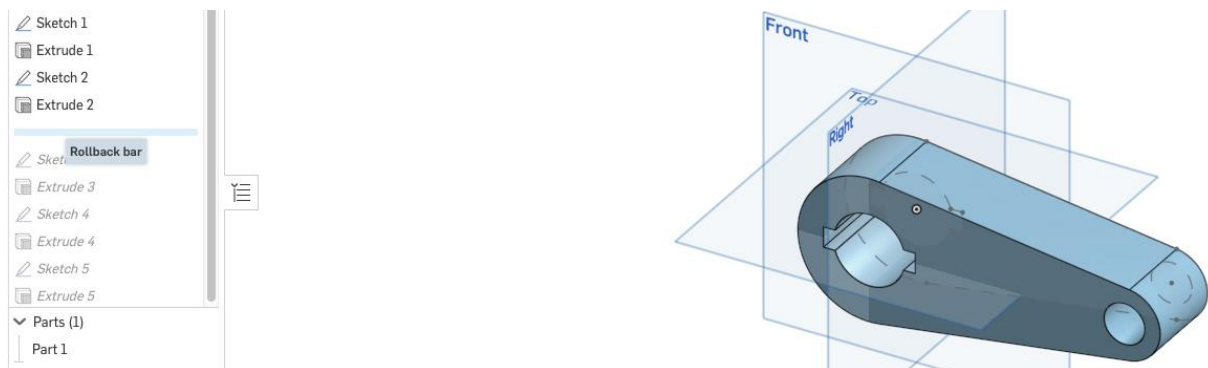
Une extrusion s'appuie sur une esquisse. Pour obtenir le volume désiré, l'esquisse doit contenir les informations nécessaires à ce volume. Si elle n'en contient pas suffisamment, e.g. une esquisse non fermée, le volume ne peut être généré, si elle en contient trop, le volume attendu ne sera pas obtenu. Par exemple, le perçage de la clavette peut être obtenu de différentes manières, e.g. perçage à la fin de la modélisation, extrusion de l'esquisse comportant tous les éléments 2D du volume fonctionnel B, etc. Certains étudiants ont extrudé un des volumes triangulaires, ont réalisé le perçage de la clavette, extrudé le second volume triangulaire en reprenant la partie centrale, comme illustré dans la figure 52. Cette séquence d'extrusions a pour conséquence de reboucher la clavette, qu'il s'agit alors de repercer dans un perçage postérieur. Cette action de « rebouchage » révèle un problème d'analyse des volumes de la pièce, qui conduit à repasser plusieurs fois sur les mêmes volumes. Cette planification de l'activité de modélisation peut entraîner la réalisation d'un cercle supplémentaire, dans une esquisse supplémentaire, qui nécessitera une extrusion supplémentaire, pour obtenir le résultat

attendu. Le reperçage de la clavette obstruée peut aussi être corrigé en appliquant une nouvelle extrusion au contour fermé de la clavette dans la même esquisse. Cette stratégie, qui entraîne la création d'une extrusion supplémentaire sans entraîner la création d'esquisse supplémentaire pour obtenir le résultat attendu, illustre la capacité à sélectionner le bon contour de l'esquisse pour réaliser l'extrusion. Le reperçage de la clavette peut donc entraîner un cercle supplémentaire dans une esquisse supplémentaire et une extrusion supplémentaire ou une extrusion supplémentaire.

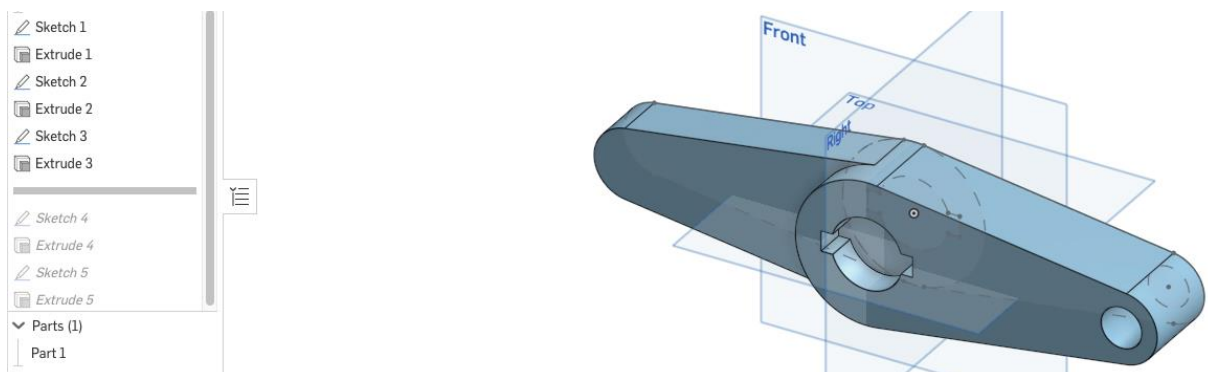
Figure 52. Séquence d'extrusions mises en œuvre pour percer la clavette



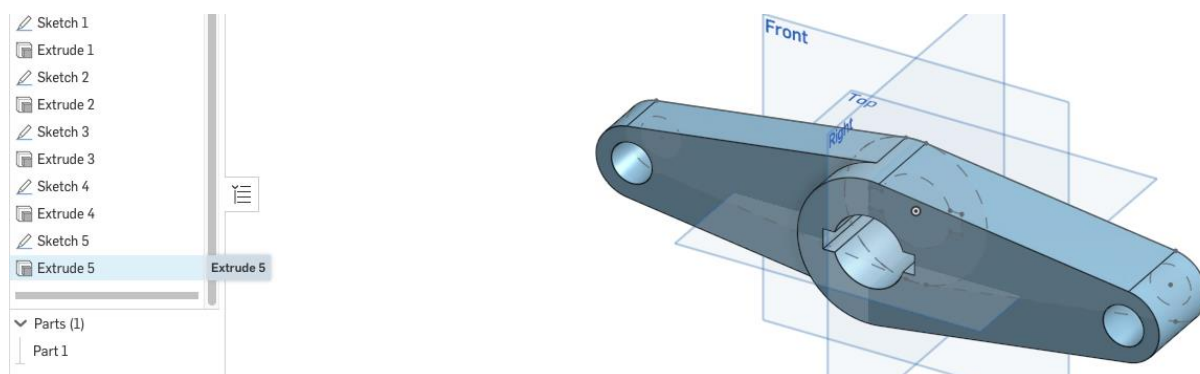
Cette figure illustre une pièce sur laquelle une extrusion *Extrude 1* a été appliquée à une esquisse *Sketch 1* pour produire le volume triangulaire B.



L'extrusion *Extrude 2* d'une deuxième esquisse *Sketch 2* permet de réaliser le perçage central et le perçage B.



L'extrusion *Extrude 3* d'une troisième esquisse *Sketch 3* pour créer le volume triangulaire A rebouche le perçage central.



Les extrusions *Extrude 4* et *5* des esquisses *Sketch 4* et *5* ont permis de repérer le trou central et réaliser le perçage A.

Nous observons deux types de stratégies de perçage de la clavette :

- direct ;
- indirect.

16.3.3 Performance et stratégies

De nouvelles catégories peuvent être créées en combinant de critères de performance et de stratégies. En associant le nombre de volumes fonctionnels produits, issu de l'évaluation de la modélisation, et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de perçage.

Tableau 36. Typologie des catégories Nombre de volumes - perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Perçage de la clavette
A	6	Direct
B	6	Rebouché
C	<6	Direct
D	<6	Rebouché

Légende. <6 = nombre de volumes inférieur à 6.

Ce tableau décrit la constitution des catégories Nombre de volumes - perçage à partir du nombre de volumes fonctionnels produits et des stratégies de perçage de la clavette.

Le nombre d'esquisses peut être dû à la stratégie de perçage, comme illustré dans la figure 50. En associant le nombre de volumes produits, issu de l'évaluation de la modélisation, le nombre d'esquisses et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie de dessin et de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de dessin, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de perçage.

Tableau 37. Typologie des catégories Nombre de volumes – esquisses - perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Nombre d'esquisses	Perçage de la clavette
A	6	≤ 6	Direct
B	6	≤ 6	Rebouché
C	6	> 6	Direct
D	6	> 6	Rebouché
E	< 6	≤ 6	Direct
F	< 6	≤ 6	Rebouché
G	< 6	> 6	Direct
H	< 6	> 6	Rebouché

Légende. < 6 = nombre inférieur à 6 ; ≤ 6 nombre inférieur ou égal à 6 ; > 6 = nombre supérieur à 6 ; ≥ 6 = nombre supérieur ou égal à 6.

Ce tableau décrit la constitution des catégories Nombre de volumes – esquisses - perçage à partir du nombre de volumes fonctionnels produits, du nombre d'esquisses produites et des stratégies de perçage de la clavette.

Le nombre d'extrusions peut être dû à la stratégie de perçage, illustrée dans la figure 50 p. 153. En associant le nombre de volumes produits, issu de l'évaluation de la modélisation, le nombre d'extrusions et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie d'extrusion et de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies d'extrusion, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de perçage.

Tableau 38. Typologie des catégories Nombre de volumes – extrusions - perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Nombre d'extrusions	Perçage de la clavette
A	6	≤ 6	Direct
B	6	≤ 6	Rebouché
C	6	> 6	Direct
D	6	> 6	Rebouché
E	< 6	≤ 6	Direct
F	< 6	≤ 6	Rebouché
G	< 6	> 6	Direct
H	< 6	> 6	Rebouché

Légende. < 6 = nombre inférieur à 6 ; ≤ 6 nombre inférieur ou égal à 6 ; > 6 = nombre supérieur à 6 ; ≥ 6 = nombre supérieur ou égal à 6.

Ce tableau décrit la constitution des catégories Nombre de volumes – extrusions - perçage à partir du nombre de volumes fonctionnels produits, du nombre d'extrusions produites et des stratégies de perçage de la clavette.

16.3.4 Synthèse des variables relevées dans l'arbre de construction et dans les esquisses

La consultation de l'arbre de construction et des projections générales dans Onshape produit des variables relatives à la stratégie :

- nombre d'esquisses ;
- nombre d'extrusions ;
- nombre de cercles ;
- stratégie de définition de la longueur totale ;
- catégorie composée L totale – symétrie ;

- catégorie composée Nombre de volumes – perçage ;
- catégorie composée Nombre de volumes – esquisses – perçage ;
- catégorie composée Nombre de volumes – extrusions – perçage.

Chapitre 17. Traitement des vidéos de modélisation

À partir de la captation de l'activité à l'écran d'un exercice de modélisation 3D réalisé à l'aide du modelleur volumique Onshape, l'encodage des observations filmées donne des indications sur la maîtrise du logiciel des étudiants, leur mobilisation des représentations spatiales et les stratégies de modélisation 3D qu'ils mettent en œuvre. Les vidéos sont soumises à un encodage pour permettre d'en extraire des données exploitables.

Un étalonnage des logiciels d'encodage de vidéos est réalisé. Le choix se porte sur le logiciel V-note Pro (version 2.7.2) en raison de la disponibilité d'informations concernant le format des vidéos, la possibilité d'annoter les vidéos, d'y insérer des transcriptions et d'exporter les données en fichiers Excel.

Ce chapitre décrit la méthodologie utilisée pour encoder les vidéos et le traitement des données issues de cet encodage.

17.1 Encodage 1

Nous avons dans un premier temps procédé au visionnage de cinq minutes de vidéo de cinq étudiants, ce qui nous a permis de relever des observables :

- d'action au clavier, e.g. saisie d'une cote sur le pavé numérique ;
- d'action de déplacement de la souris, e.g. rotation de la forme à l'aide de la souris ;
- de production d'un élément du profil à l'aide la souris, e.g. clique sur l'écran pour définir le centre d'un cercle ;
- de choix d'une contrainte, e.g. *Coincident* (Sélectionner au moins deux points, lignes ou surfaces pour qu'ils soient placés précisément l'un sur l'autre) ;
- de choix de création d'une entité géométrique, e.g. *Center Point Cercle* (Créer un cercle à partir de son centre) ;
- d'attribution d'une fonction, e.g. *Extrude* (Créer une nouvelle extrusion) ;
- d'outil de visionnage, e.g. *Reveal* (Rendre une extrusion ou une esquisse visible) ;
- de réponse du logiciel, e.g. message d'erreur ;
- de mouvement de la tête, e.g. hoche la tête ;
- de regard, e.g. regard vers le tutoriel ;
- de verbalisation, e.g. discute de l'exercice avec le voisin.

Ce découpage permet d'identifier les opérations composant des actions de modélisation, e.g. l'action « produire un cercle » est découpée en une séquence d'opérations : sélection de création de l'entité géométrique cercle (CPC), clique pour déterminer le centre du cercle (CPD), clique pour déterminer l'extérieur du cercle (CPD), affichage du cercle à l'écran AFFICHAGE.

Un kit d'encodage est conçu, consultable en Annexe 13. Il est testé auprès de deux observateurs externes à partir d'un extrait vidéo de trois minutes. Après confrontation des différences d'encodage relevées avec les observateurs, un accord sur 87,5% pour la catégorie Action au clavier et 90% pour la catégorie Regard est trouvé. Les discussions avec les observateurs externes révèlent un manque de précision de la description des catégories Action de déplacement de la souris, Réponse du logiciel, Mouvement de la tête et Verbalisation. Ces descriptions sont révisées. Le kit d'encodage est consultable en Annexe 14.

Les indicateurs de mouvement de la tête sont abandonnés car il est difficile de leur attribuer une interprétation. Les indicateurs Choix d'une contrainte, Choix de création d'une entité géométrique, Attribution d'une fonction et Outils de visionnage récurrents sont détaillés en une liste, présentée dans le tableau 39, à partir de l'encodage de cinq minutes de vidéo de cinq nouveaux étudiants.

Tableau 39. Liste des contraintes, entités géométriques, fonctions et outils de visionnage récurrents

Code	Intitulé dans Onshape	Définition
Dim	<i>Dimension</i>	Affecter une cote ou un angle
Line	<i>Line</i>	Créer un segment
CPC	<i>Center point circle</i>	Créer un cercle à partir de son centre
N Extr	<i>Extrude</i>	Créer une nouvelle extrusion
Trim	<i>Trim</i>	Rogner un élément
Tang	<i>Tangent</i>	Créer une tangence entre deux éléments
Blind	<i>Blind</i>	Déterminer le sens de l'extrusion
Remove	<i>Remove</i>	Retirer de la matière quand on extrude.
Annule	<i>Undo</i>	Annuler l'action précédente
Conc	<i>Concentric</i>	Rendre deux cercles concentriques
CPR	<i>Center point rectangle</i>	Créer un rectangle à partir de son centre
Hor	<i>Horizontal</i>	Rendre un segment, un ensemble de segments ou un ensemble de points horizontaux
COINC	<i>Coincident</i>	Sélectionner au moins deux points, lignes ou surfaces pour qu'ils soient placés précisément l'un sur l'autre
Extrude	<i>Extrude</i> suivi du numéro	Ouvrir une extrusion existante
CR	<i>Corner rectangle</i>	Créer un rectangle à partir d'un coin
Cube	<i>View cube</i>	Sélectionner un plan de visualisation
New Sketch	<i>Sketch</i>	Créer une nouvelle esquisse
Equal	<i>Equal</i>	Rendre deux cotes égales (segments et rayons)
Reveal	<i>Reveal</i>	Rendre une extrusion ou une esquisse visible

Note. Ce tableau liste les fonctions récurrentes mobilisées par un échantillon de 5 sujets pour 5 minutes de vidéo par sujet, les codes qui leur sont affectées pour l'encodage et les définitions de ces fonctions. Adapté d'Onshape, (2022).

Chaque vidéo nécessite trois visionnages pour l'encodage :

- un passage pour les indicateurs relatifs au regard et les verbalisations ;
- un passage pour les indicateurs relatifs au déplacement de la souris ;
- un passage pour les indicateurs relatifs au choix des fonctions.

Le logiciel V-note Pro permet l'utilisation d'un pédalier. Nous affectons les fonctions Pause et Reprise de la lecture au pédalier Docooler PCensor USB 2 Foot Switch de manière à ce que les mains soient réservées à l'encodage. Les codes des indicateurs sont reportés sur des pastilles de couleurs collées sur les touches d'un clavier dédié. Les couleurs regroupent les indicateurs concernés par une même catégorie. Ainsi les indicateurs relatifs au regard et aux verbalisations

sont indiqués sur des pastilles orange et bleues, les indicateurs relatifs à la manipulation du clavier sont indiqués sur des pastilles vertes et les indicateurs relatifs à la souris sont indiqués sur des pastilles rouges. Après l'encodage de quelques vidéos, les indicateurs les plus sollicités sont regroupés au centre du clavier pour permettre un encodage plus confortable. Une fois le plan de touches stabilisé, le clavier est recouvert d'un film plastique pour fixer les pastilles et éviter que les intitulés ne s'effacent. Il est illustré figure 53.

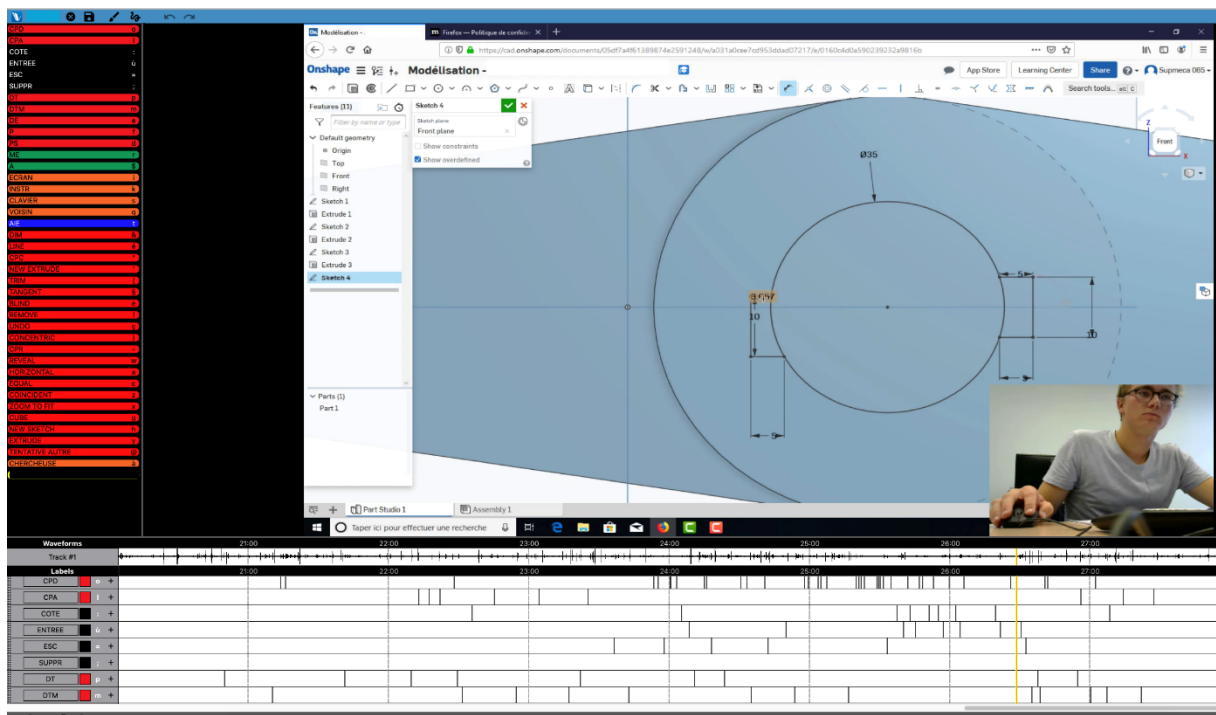
Figure 53. Clavier dédié à l'encodage



Note. Le clavier dédié à l'encodage est étiqueté de pastilles de couleur sur lesquelles sont reportés les codes des indicateurs.

Un code couleur similaire est affecté aux étiquettes dans le logiciel d'encodage V-note Pro. On y ajoute la distinction entre les indicateurs Affichages de l'écran en vert et les indicateurs Clavier en noir. Une saisie de l'écran d'encodage dans V-note Pro est illustrée dans la figure 54.

Figure 54. Écran d'encodage dans V-note Pro



Note. Les étiquettes dans V-note Pro reprennent les indicateurs de l'encodage et les couleurs des pastilles du clavier.

L'encodage est réalisé en priorité pour les vingt-quatre étudiants sélectionnés par le recueil 3 (observation filmée de conception de groupe), puis pour les quatre premiers étudiants de l'alphabet. Ces vidéos durent en moyenne 23 minutes. Chaque vidéo nécessitant trois visionnages, il est décidé de se limiter à cet échantillon.

17.2 Encodage 2

L'étude des traces peut être exploitée de manière à identifier des comportements communs à l'aide de techniques de classification ascendante hiérarchique (Jaillet, 2009, p. 29). Notre encodage des vidéos vise à produire des séquences exploitables pour l'analyse de séquences.

Après repérage de séquences d'indicateurs constituant des opérations dans les vidéos des étudiants et en extrapolant à partir de ces observations, une bibliothèque de 227 actions brutes mobilisables est créée. Certaines actions sont constituées d'une seule opération e.g. regarder le voisin = VOISIN, d'autres regroupent une suite d'opérations qui constituent une action simple e.g. produire un cercle = CPC CPD CPD AFFICHAGE, d'autres encore, regroupent une suite d'opérations qui constituent une action complexe e.g. produire la moitié d'un rectangle = LINE CPD CPD AFFICHAGE CPD AFFICHAGE CPD AFFICHAGE.

Les séquences issues de l'Encodage 1 sont traitées à l'aide d'un programme en langage Python (van Rossum, 1991) qui détecte les actions de la bibliothèque, les liste dans leur ordre d'apparition et calcule leur distribution. Le programme identifie les actions brutes. Les actions brutes ne tiennent pas en compte les indicateurs de Regard, d'Exploration du logiciel, d'Affichage du logiciel, de possibilités de Visualisation offertes par le logiciel lorsque ces indicateurs sont inclus dans une séquence d'opérations identifiée comme constituant une action, e.g. saisir une cote = CLAVIER COTE ENTREE ECRAN est traduit COTE par le programme.

L'encodage des séquences d'opération issues de l'Encodage 1 avec la bibliothèque de 227 actions brutes permet d'atteindre un taux de recouvrement inférieur à 90% des opérations issues de l'Encodage 1 grâce à l'Encodage 2 en actions brutes.

Tableau 40. Taux de recouvrement de l'Encodage 2

Statistique descriptive	Recueil 1	Recueil 2
Moyenne	89,29	85,58

Note. Les résultats sont indiqués en pourcentage.

Ce tableau indique les moyennes, exprimées en pourcentages, des opérations couvertes par l'encodage à partir de la bibliothèque de 227 actions brutes pour les deux recueils.

17.3 Encodage 3

Pour obtenir un taux de recouvrement plus élevée des opérations issues de l'Encodage 1, l'Encodage 2 est repris manuellement en relevant 25 nouvelles actions, en regroupant certaines actions sous la même catégorie et en corrigeant les effets d'encodage dus à l'Encodage 2. Ceci amène à la production d'une bibliothèque de 145 actions brutes mobilisables. Les séquences issues de l'Encodage 1 sont de nouveau traitées à l'aide du programme en langage python pour calculer les taux de distribution des actions brutes.

17.4 Encodage 4

Pour réduire le nombre d'actions mobilisées, de nouvelles catégories sont regroupées : e.g. Fonction, Fonction SORT et Fonction SORT ESC sont regroupées sous la même action. La bibliothèque des actions brutes est réduite à 126 items. Les fautes de frappe dues à l'Encodage 3 manuel sont corrigées, suite à leur identification, à l'aide d'un programme en langage Python.

Tableau 41. Distribution des actions brutes et indicées de l'Encodage 4

Statistiques descriptives	R1	R2
Moyenne actions/étudiant	304	247
Médiane	278	238
Maximum	655	597
Minimum	101	119
Écart-type	151	118

Ce tableau indique les statistiques descriptives des actions brutes issues de l'encodage à partir de la bibliothèque de 145 actions brutes pour les deux recueils.

Le nombre d'actions est plus faible au deuxième recueil.

Le nombre d'actions est catégorisé selon qu'il est élevé, modéré ou faible d'après la distribution des valeurs au premier recueil :

- les valeurs inférieures ou égales au premier quartile sont catégorisées faibles ;
- les valeurs supérieures au quartile 1 et inférieures ou égales au quartile 3 sont catégorisées modérées ;
- les valeurs supérieures au quartile 3 sont catégorisées élevées.

La catégorisation se décline donc selon la répartition décrite dans le tableau 42.

Tableau 42. Catégorisation du nombre d'actions

	Catégorie 3	Catégorie 2	Catégorie 1
Occurrence	Faible Valeur $\leq Q1$	Modérée $Q1 < \text{Valeur} \leq Q3$	Élevée $Q3 < \text{Valeur}$
Indicateur	0-187	188-410	411-655

Légende. Q1 = premier quartile ; Q2 = deuxième quartile ; Q3 = troisième quartile ; $<$ = inférieur à ; \leq = inférieur ou égal à.

Ce tableau décrit les catégories d'étudiants selon le nombre d'actions qu'ils ont réalisées.

Cette répartition est appliquée aux valeurs des dimensions des deux recueils. La distribution du recueil 1 pour des trois dimensions est illustrée dans le tableau 43.

Tableau 43. Table de fréquence des indices Nombre d'actions

Catégorie	Recueil 1	
	<i>n</i>	%
1	7	25,0
2	14	50,0
3	7	25,0
Total	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 3 est inférieur ou égal au quartile 1, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 3 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 1.

17.5 Création de dimensions relatives à plusieurs indicateurs

Certaines actions peuvent être regroupées sous des dimensions lorsqu'elles ont une caractéristique commune. Toutes les actions suivies d'un message d'erreur sont regroupées sous la dimension Erreur. Les messages d'erreur concernent :

- les sur-contraintes ;
- le sens de l'extrusion ;
- le choix du plan de l'extrusion ;
- le choix du type d'extrusion : retirer un volume, ajouter un volume, créer un nouveau volume indépendant.

De même, les actions amorcées puis abandonnées sont regroupées sous la dimension Avortements, et les actions de même nature successives sont regroupées sous la dimension Factorisation, e.g. la création successive de quatre cercles. On obtient ainsi les dimensions Avortements, Erreurs et Factorisation.

Comme pour le nombre d'actions, les valeurs pour chaque dimension sont catégorisées selon qu'elles sont élevées, modérées ou faibles d'après la distribution des valeurs au premier recueil. Pour les trois dimensions, la catégorisation se décline donc selon la répartition décrite dans le tableau 44.

Tableau 44. Catégorisation des dimensions Avortements, Erreurs et Factorisation

Dimension	Catégorie 3	Catégorie 2	Catégorie 1
	Occurrence faible Valeur $\leq Q1$	Occurrence modérée $Q1 < \text{Valeur} \leq Q3$	Occurrence élevée $Q3 < \text{Valeur}$
Avortements	0-1	2-4	5-13
Erreurs	0-3	4-9	10-28
Factorisation	0-12	13-17	18-29

Légende. Q1 = premier quartile ; Q2 = deuxième quartile ; Q3 = troisième quartile ; $<$ = inférieur à ; \leq = inférieur ou égal à.

Ce tableau décrit les catégories d'occurrence des dimensions Avortements, Erreurs et Factorisation.

Cette répartition est appliquée aux valeurs des dimensions des deux recueils. La distribution du recueil 1 pour des trois dimensions est illustrée dans le tableau 45.

Tableau 45. Table de fréquence des dimensions Avortements, Erreurs et Factorisation – Recueil 1

Dimension	Occurrence faible Scores $\leq Q1$		Occurrence modérée $Q1 < \text{scores} \leq Q3$		Occurrence élevée $Q3 < \text{Scores}$		Total	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Avortements	7	25,0	11	39,3	10	35,7	28	100
Erreurs	5	17,9	16	57,1	7	25,0	28	100
Factorisation	7	25,0	14	50,0	7	25,0	28	100

Légende. N = nombre d'étudiants par catégorie ; % = pourcentage d'étudiants par catégorie ; Q1 = premier quartile ; Q2 = deuxième quartile ; Q3 = troisième quartile ; $<$ = inférieur à ; \leq = inférieur ou égal à.

Ce tableau décrit la fréquence d'occurrence des catégories des dimensions Avortements, Erreurs et Factorisation au premier recueil.

17.6 Temps de réalisation

L'encodage des vidéos permet aussi de relever le temps de réalisation de l'exercice. Le début de l'activité de modélisation est défini à partir du moment où l'étudiant a terminé de définir l'unité de mesure comme spécifié dans le tutoriel. Le temps de fin est déterminé par le moment juste avant que l'étudiant enregistre son travail, comme indiqué dans le tutoriel. La différence entre ces deux points de repère permet de déterminer le temps de réalisation.

Comme pour le nombre d'actions, les valeurs pour chaque dimension sont catégorisées selon qu'elles sont élevées, modérées ou faibles d'après la distribution des valeurs au premier recueil. La catégorisation se décline donc selon la répartition décrite dans le tableau 46.

Tableau 46. Catégorisation de l'indice Temps de réalisation

	Catégorie 3	Catégorie 2	Catégorie 1
Occurrence	Faible Valeur \leq Q1	Modérée Q1 < Valeur \leq Q3	Élevée Q3 < Valeur
Indicateur	0-920	921-1085	1086-2890

Légende. Q1 = premier quartile ; Q2 = deuxième quartile ; Q3 = troisième quartile ; $<$ = inférieur à ; \leq = inférieur ou égal à.

Ce tableau décrit les catégories Temps de réalisation.

Cette répartition est appliquée aux valeurs des dimensions des deux recueils. La distribution du recueil 1 est illustrée dans le tableau 47.

Tableau 47. Table de fréquence de l'indice Temps de réalisation

Occurrence faible Scores \leq Q1		Occurrence modérée Q1 < scores \leq Q3		Occurrence élevée Q3 < Scores		Total	
N	%	N	%	N	%	N	%
7	25,0	14	50,0	7	25,0	28	100

Légende. n = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

17.7 Synthèse des variables issues de l'encodage des vidéos

L'encodage des vidéos a permis d'extraire les données suivantes :

- nature des opérations ;
- nature des actions ;
- nombre d'opérations ;
- nombre d'actions brutes ;
- nombre d'actions indicées ;
- nombre d'actions factorisées ;
- nombre de messages d'erreur ;
- temps de réalisation ;
- catégories de nombre d'actions avortées ;
- catégories de nombre de messages d'erreur ;
- catégories de nombre de factorisation.

17.8 Traitement des vidéos du travail de groupe de la séance de modélisation avec le modeleur volumique CATIA

Une observation des vidéos des séances de groupe enregistrées à partir des webcams a été effectuée par sondage à la trentième et la soixantième minute des vidéos individuelles. De manière à qualifier l'activité des membres, nous orientons cette observation sur les logiciels et les supports documentaires en ligne utilisés par les étudiants. Le tableau 48 décrit le logiciel et le document utilisé, le cas échéant, des étudiants à la trentième minute et la soixantième minute des enregistrements.

Tableau 48. Relevé d'activité de la séance de modélisation en groupe

Équipe	Membre	Logiciel			Support	
		30e mn	60e mn	Remarque	30e mn	60e mn
Carré	1	Excel	CATIA		Instructions	Catalogue
Carré	2	CATIA	Excel		Cours	
Carré	3	Excel	Excel		Catalogue	
Hexagone	1	Excel	Excel		Cours	Catalogue
Hexagone	2	Excel	Excel		Instructions	
Hexagone	3	CATIA	CATIA		Cours	Catalogue
Triangle	1	CATIA	CATIA	CATIA: les membres ne travaillent pas les mêmes pièces		
Triangle	2	Excel	CATIA		Cours	
Triangle	3	Excel	CATIA		Instructions	Cours
Cercle	1	Excel	CATIA	CATIA: les membres ne travaillent pas les mêmes pièces	Cours	
Cercle	2	Excel	CATIA		Cours	Catalogue
Cercle	3	CATIA	Excel		Cours	Catalogue
Trapèze	1	CATIA	Excel		Instructions	
Trapèze	2	CATIA	Excel		Instructions	Cours
Trapèze	3	CATIA	Excel		Catalogue	
Pacman	1	Excel	Excel			
Pacman	2	Excel	Excel		Cours	
Pacman	3	Excel	Excel		Cours	
Cylindre	1	Excel	CATIA		Cours	Catalogue
Cylindre	2	CATIA	CATIA		Catalogue	
Cylindre	3	Excel	Excel		Catalogue	Cours
Cube	1	CATIA	CATIA	CATIA: les membres ne travaillent pas les mêmes pièces	Catalogue	
Cube	2	CATIA	Excel		Catalogue	
Cube	3	CATIA	Excel		Instructions	Cours

Ce relevé montre qu'au même moment les membres d'un groupe utilisent parfois le même logiciel, et parfois des logiciels différents, en s'appuyant parfois sur des documents de même nature, et parfois sur des documents de nature différente. Nous remarquons aussi que dans le cas des équipes Triangle, Cercle et Cube, les membres utilisant le modeleur volumique travaillent sur des pièces différentes. Nous constatons que les étudiants s'acquittent de tâches différentes au sein d'un groupe : ils travaillent à des problèmes différents, dans le but d'atteindre

un objectif commun. En d'autres mots, les étudiants se sont répartis les tâches et ainsi opté pour une activité coopérative, une des organisations possibles du travail collectif (Metz, 2009, section Problématique générale). Notre recherche visant à explorer les échanges ayant lieu au sujet de problèmes spatiaux partagés par les membres d'une équipe, nous renonçons à exploiter ces enregistrements.

Chapitre 18. Présentation des données de l'étude et des hypothèses

Les données sont issues de différentes sources :

- les tests spatiaux décrits dans le chapitre 10 : recueil 1 à l'arrivée des étudiants en études d'ingénieurs et recueil 2 à la fin du premier semestre d'enseignements ;
- les QCM Stratégies : recueils 1 et 2 ;
- les questionnaires ouverts Stratégies : recueils 1 et 2 ;
- les QCM Loisirs enfance et adolescence : recueil 1 ;
- les QCM Loisirs âge actuel : recueil 1 ;
- les modélisations réalisées sur la plateforme de conception Onshape : recueils 1 et 2 ;
- les vidéos enregistrées lors de la séance de modélisation Onshape : recueils 1 et 2 ;
- les notes individuelles des enseignements du premier semestre PCAT, AMEC, MAPP, MSOL, ALGO ;
- des données sociodémographiques obtenues auprès des services de scolarité.

Ce chapitre regroupe les variables issues des traitements des données brutes et présentent les hypothèses de recherche que nous posons pour répondre à notre problématique de recherche.

18.1 Variables intrinsèques

Les tests du PSVT:V, du R PSVT:R du MRT, du MCT et du CFT donnent accès à des scores de performance pour les quatre facteurs spatiaux composant l'habileté spatiale selon le modèle de Tartre. Nous adoptons la nomenclature PSVT:V1, R PSVT:R1, MRT1, MCT1 et CFT1 pour décrire les données relatives à la première prise d'information, et PSVT:V2, R PSVT:R2, MRT2, MCT2 et CFT2 pour la seconde.

Les QCM Stratégies donnent accès aux stratégies déclarées mobilisées par les étudiants pour les cinq tests spatiaux à partir d'une liste de stratégies spécifique à chaque test. Les réponses concernent l'ensemble d'un test, ne sont pas spécifiques à une question et sont limitées aux choix que nous avons proposés. Les données issues de l'encodage des réponses renvoient à la nature, aux combinaisons et au nombre de stratégies adoptées pour chaque test.

Les questionnaires ouverts Stratégies donnent accès aux stratégies déclarées mobilisées par les étudiants pour répondre à trois items issus de chaque test spatial. Les réponses sont spécifiques aux questions des cinq tests que nous avons sélectionnées. Les données issues de l'encodage renvoient à la nature, aux séquences et au nombre de stratégies adoptées pour chaque item.

Les modélisations ont été réalisées sur la plateforme de conception Onshape avec un profil *Education* et un partage des réalisations avec l'équipe d'affectation. Ceci nous permet d'accéder aux modélisations des étudiants pour les consulter et produire les dessins techniques correspondant à leurs modélisations. L'arbre de construction et les dessins techniques donnent accès à des données permettant d'évaluer la capacité à modéliser en 3D et les stratégies mises en œuvre pour produire ces modélisations. Les vidéos issues de la captation des modélisations donnent accès aux stratégies de modélisation et au temps de réalisation.

18.2 Variables extrinsèques

Les questionnaires à choix multiple Loisirs donnent des indications sur la nature des loisirs et la fréquence à laquelle les étudiants les ont pratiqués pour la temporalité enfance et adolescence et la temporalité âge actuel. Deux items ont été rajoutés concernant la prévalence manuelle et les logiciels de modélisation utilisés par les étudiants avant leur entrée en études d'ingénieurs. Les réponses sont limitées aux choix que nous avons proposés. Les données issues de l'encodage des questions dédiées aux loisirs donnent accès aux caractéristiques dynamique, manipulateur, 2D, de construction 3D et artistique des loisirs pratiqués. Les réponses issues de la question concernant les logiciels de modélisation utilisés fournissent des données sur la nature et le nombre de logiciels connus avant l'entrée en études d'ingénieurs. L'item sur la prévalence manuelle nous renseigne sur la pratique déclarée des étudiants.

Les notes individuelles des enseignements du premier semestre PCAT, AMEC, MAPP, MSOL, ALGO et le score de TOEIC donnent des indications sur le niveau de performance des étudiants dans leurs études d'ingénierie, que ces matières mobilisent des représentations spatiales ou non.

Les données sociodémographiques obtenues auprès de la scolarité complètent les informations sur la prévalence manuelle renseignée dans le questionnaire Loisirs et concernent le genre et la formation reçue par les étudiants avant de rejoindre l'école d'ingénieurs. Nous avons d'autre part consulté les étudiants pour connaître leur nombre de langues maternelles.

18.3 Synthèse des données

Le tableau 49 reprend l'ensemble des données issues des recueils.

Tableau 49. Récapitulatif des données recueillies et variables identifiées

Outil	Données	Nature des données	Variables		
Tests spatiaux	Scores	Intrinsèques	Performance spatiale		
Questionnaire ouvert Stratégies	Verbatim	Intrinsèques	Stratégies de résolution, e.g. rotation mentale	Stratégies d'explicitation, e.g. dessin	
QCM Stratégies	Catégories individuelles et combinées	Extrinsèques	Stratégies et combinaison de stratégies, e.g. rotation mentale	Nombre de stratégies	Changement de stratégie
Questionnaire Loisirs	Indice sur échelle de Likert	Extrinsèques	Pratiques ludiques et fréquence	Pratique antérieure de logiciels de modélisation	Prévalence manuelle
Base de données école	Données individuelles	Extrinsèques	Caractéristiques sociodémographiques i.e. sexe	Caractéristiques académiques i.e. filière d'origine	Niveau d'anglais
Modélisation 3D individuelle sur Onshape	Observations filmées	Intrinsèques	Performance i.e. temps de réalisation	Stratégies de modélisation 3D, e.g. factorisation des actions	
Évaluation de la modélisation 3D	Scores	Intrinsèques	Performance		
Évaluation de la modélisation 3D	Issues des réalisations, e.g. arbre de construction	Intrinsèques	Stratégies de modélisation 3D, e.g. nombre d'esquisses		
Évaluations académiques	Scores	Extrinsèques	Performance		

Ce tableau décrit la nature des données et des variables recueillies.

18.4 Hypothèses de recherche

Ces données sont soumises à des traitements statistiques pour explorer les dimensions :

- lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles, qui sera décrit chapitre 19 ;
- lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles, qui sera décrit chapitre 20 ;
- évolutions en habileté spatiale et en modélisation 3D suite à des enseignements en école d'ingénieurs, qui seront décrites chapitres 21 et 22 ;
- caractérisation de l'activité de modélisation, qui sera décrit dans le chapitre 23.

Les traitements statistiques sont réalisés à l'aide du logiciel de statistiques SPP (version 28.0.0.0 (190)).

18.4.1 Lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles (hypothèses HS)

Selon la littérature relative à la recherche sur l'habileté spatiale présentée dans le chapitre 2, l'habileté spatiale, telle que mesurée par les tests spatiaux, est liée au genre (Cooke-Simpson et Voyer, 2007; Maeda et Yoon, 2013; Moè, 2009), à la prévalence manuelle (Gorska *et al.*, 1998; Guay et McDaniel, 1978; Somers *et al.*, 2015) et aux pratiques ludiques de l'enfance (Gold *et al.*, 2018; Górski *et al.*, 1998). Il est d'autre part mis en exergue dans plusieurs études, que différentes stratégies sont adoptées pour résoudre les problèmes spatiaux présentés dans des tests spatiaux (Albaret et Aubert, 1996; Guay, 1980; Hegarty, 2018; Lohman, 1993) et que certains sujets changent de stratégies au sein d'un même test (Kyllonen *et al.*, 1981; Lohman et Kyllonen, 1983). Ces précédents résultats nous incitent à en vérifier la conformité pour notre échantillon.

Nous proposons d'approfondir les précédentes recherches sur le lien entre les pratiques ludiques et l'habileté spatiale en explorant la relation entre performance aux tests spatiaux et pratiques ludiques contemporaines au recueil, étant donné la malléabilité de l'habileté spatiale à tout âge (Uttal *et al.*, 2013, p. 366). De plus, l'efficacité de la pratique de modèles volumiques sur le développement de l'habileté spatiale ayant été établie (Martín-Dorta *et al.*, 2008, p. 509; Górski et Sorby, 1998, cité dans Sorby, 1999b, p. 4.465.2), nous souhaitons vérifier si la pratique de modèles volumiques incluse dans les formations précédant les études d'ingénieur peut être liée à la performance spatiale des étudiants à leur arrivée en études d'ingénieurs. Finalement, nous proposons d'investiguer d'avantage la relation entre habileté spatiale et stratégies de résolution en étudiant la relation entre performance aux tests et combinaisons de stratégies adoptées, et en cherchant à identifier si certaines stratégies sont dominantes, quelle que soit la compétence visée par le test.

18.4.1.1 Variables extrinsèques

- Hypothèse HS1 : La performance aux tests spatiaux est liée au genre.
- Hypothèse HS2 : Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux aux tests spatiaux que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques.
- Hypothèse HS3 : La performance aux tests spatiaux est liée à la prévalence manuelle.
- Hypothèse HS4 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles.
- Hypothèse HS5 : La performance aux tests spatiaux est liée à la pratique de logiciels de modélisation.
- Hypothèse HS6 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de logiciels de modélisation pratiqués.
- Hypothèse HS7 : La performance spatiale est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence.
- Hypothèse HS8 : La performance spatiale est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données.
- Hypothèse HS9 : La performance spatiale est liée au niveau d'anglais.

18.4.1.2 Variables intrinsèques

- Hypothèse HS10 : Les étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies dans un test.

- Hypothèse HS11 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées.
- Hypothèse HS12 : La performance aux tests spatiaux est liée aux combinaisons de stratégies mobilisées : certaines combinaisons sont plus efficaces que d'autres.
- Hypothèse HS13 : Les étudiants changent de stratégie au sein d'un test.
- Hypothèse HS14 : Les étudiants déclarant changer de stratégies au sein d'un même test performant mieux que les étudiants qui utilisent toujours la même stratégie.

18.4.2 Lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles (hypothèses MV)

Selon la littérature de recherche sur l'habileté spatiale, cette habileté, telle que mesurée par les tests spatiaux, est liée à la performance à des exercices de modélisation (Branoff et Dobelis, 2012b, p. 41; Steinhauer, 2012, p. 47) et à leurs stratégies de résolution (Agbanglanon, 2019).

Les études concernant les stratégies de modélisation s'intéressent à des indicateurs de performance (e.g. justesse des modèles produits, temps de réalisation) (Chester, 2007, p. 30; Lang *et al.*, 1991, p. 260; Rynne et Gaughran, 2007, p. 64) et à des indicateurs des stratégies déployées dans ces modélisations (e.g. nombre de caractéristiques (Hamade *et al.*, 2005, p. 312; Rynne et Gaughran, 2007, p. 64), nombre de commandes utilisées (Lang *et al.*, 1991, p. 259)).

Ces précédents résultats nous incitent à en vérifier la conformité pour notre échantillon d'une part et à en explorer l'articulation d'autre part. Nous vérifierons d'abord la relation entre performance en modélisation et caractéristiques individuelles. Nous nous arrêterons sur certains éléments de ces réalisations pour étudier leur lien avec les scores spatiaux, puis la relation entre les stratégies déployées dans leur production et la performance aux tests spatiaux. Nous chercherons ensuite à caractériser le lien entre les modélisations produites et les stratégies mobilisées dans cette tâche.

18.4.2.1 Variables extrinsèques

- Hypothèse MV1 : La performance en modélisation volumique est liée au genre.
- Hypothèse MV2 : Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux à l'exercice de modélisation volumique que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques.
- Hypothèse MV3 : La performance en modélisation volumique est liée à la prévalence manuelle.
- Hypothèse MV4 : La performance en modélisation volumique est liée au nombre de langues maternelles.
- Hypothèse MV5 : Les étudiants ayant déjà pratiqué des logiciels de modélisation performant mieux à l'exercice de modélisation volumique.
- Hypothèse MV6 : La performance en modélisation volumique est liée au nombre de logiciels pratiqués.
- Hypothèse MV7 : La performance en modélisation volumique est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence.
- Hypothèse MV8 : La performance en modélisation volumique est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données.
- Hypothèse MV9 : La performance en modélisation volumique est liée au niveau d'anglais.

- Hypothèse MV10 : La capacité à produire les six volumes fonctionnels est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV11 : La performance en modélisation volumique est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV12 : Le nombre de cercles produits est lié aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV13 : Le nombre d'esquisses produites est lié aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV14 : Le nombre d'extrusions produites est lié aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV15 : La stratégie de perçage de la clavette est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV16 : La catégorie Nombre de volumes – perçage est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV17 : La catégorie Nombre de volumes – esquisses – perçage est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV18 : La catégorie Nombre de volumes – extrusions - perçage est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV19 : La stratégie de définition de la longueur totale est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV20 : La capacité à contraindre la symétrie est liée aux scores spatiaux.
- Hypothèse MV21 : La catégorie Longueur totale-symétrie est liée aux scores spatiaux.

18.4.2.2 Variables intrinsèques

- Hypothèse MV22 : La performance en modélisation est liée à la stratégie de perçage de la clavette.
- Hypothèse MV23 : La performance en modélisation est liée à la stratégie de longueur totale.
- Hypothèse MV24 : La performance en modélisation est liée à la stratégie Longueur totale - symétrie.

18.4.3 Évolutions en habileté spatiale suite à des enseignements en école d'ingénieurs (hypothèses EHS)

La malléabilité de l'habileté spatiale grâce à des dispositifs de formation est établie (Uttal *et al.*, 2013). Parmi les 106 études traitées dans la méta-analyse d'Uttal *et al.*, quarante-huit études détaillent les scores avant et après intervention séparément pour les hommes et les femmes. Ces données permettent aux chercheurs de déterminer que les performances des femmes et des hommes ont progressé similairement (p. 364). Nous souhaitons déterminer si les enseignements suivis au premier semestre, bien qu'ils ne soient pas destinés à faire progresser l'habileté spatiale des étudiants, ne contribuent pas à une éventuelle évolution et cette évolution est avérée, si elle est liée aux caractéristiques individuelles. Nous distinguerons les enseignements dont nous pensons que le contenu est directement à la modélisation volumique, i.e. Prise en mains de CATIA (PCAT), Analyse de mécanismes (AMEC) et Algorithmiques et programmation (ALGO), que nous considérerons comme des variables intrinsèques, des autres enseignements, i.e. Mécanique des solides (MSOL) et Mathématique appliquées (MAPP).

18.4.3.1 Variables extrinsèques

- Hypothèse EHS1 : Les scores des tests spatiaux ont évolué entre les deux prises de données.
- Hypothèse EHS2 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au genre.

- Hypothèse EHS3 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la prévalence manuelle.
- Hypothèse EHS4 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la formation.
- Hypothèse EHS5 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la pratique de logiciels antérieure aux enseignements.
- Hypothèse EHS6 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de logiciels pratiqués avant les enseignements.
- Hypothèse EHS7 : L'évolution des tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles.
- Hypothèse EHS8 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au niveau d'anglais.
- Hypothèse EHS9 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiques dans l'enfance et l'adolescence.
- Hypothèse EHS10 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiques à l'âge adulte.
- Hypothèse EHS11 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements MSOL.
- Hypothèse EHS12 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements MAPP.

18.4.3.2 Variables intrinsèques

- Hypothèse EHS13 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements PCAT.
- Hypothèse EHS14 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements AMEC.
- Hypothèse EHS15 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements ALGO.
- Hypothèse EHS16 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies déclarées mobilisées au second recueil.
- Hypothèse EHS17 : L'évolution des tests spatiaux est liée à la capacité à changer de stratégie au second recueil.
- Hypothèse EHS18 : L'évolution des tests spatiaux est liée aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées au second recueil.

18.4.4 Évolutions en modélisation volumique suite à des enseignements en école d'ingénieurs (hypothèses EMV)

Les étudiants ont assisté à des enseignements liés aux sciences de l'ingénieur. Deux de ces cours mobilisent la modélisation volumique : le cours d'analyse des mécanismes AMEC et le cours de conception collaborative de mécanisme CCME, dont l'évaluation individuelle PCAT a lieu après la prise en mains du logiciel de modélisation volumique CATIA. Nous souhaitons déterminer si ces enseignements ont eu un effet sur la performance en modélisation, telle que nous l'avons évaluée dans notre expérimentation. Nous souhaitons de plus préciser si cette potentielle évolution est liée aux caractéristiques sociodémographiques, et aux compétences spatiales des étudiants. Finalement, nous explorerons la relation entre cette performance et les stratégies de modélisation des étudiants.

18.4.4.1 Variables extrinsèques

- Hypothèse EMV1 : Les scores de l'exercice de modélisation ont évolué entre les deux prises de données.
- Hypothèse EMV2 : L'évolution de la performance en modélisation est liée au genre.
- Hypothèse EMV3 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à la prévalence manuelle.
- Hypothèse EMV4 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à la formation.
- Hypothèse EMV5 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à la pratique antérieure de logiciels de modélisation.
- Hypothèse EMV6 : L'évolution de la performance en modélisation est liée au nombre de logiciels pratiqués avant les enseignements.
- Hypothèse EMV7 : L'évolution de la performance en modélisation est liée au nombre de langues maternelles.
- Hypothèse EMV8 : L'évolution de la performance en modélisation est liée au niveau d'anglais.
- Hypothèse EMV9 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux loisirs pratiques dans l'enfance et l'adolescence.
- Hypothèse EMV10 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux loisirs pratiques à l'âge adulte.
- Hypothèse EMV11 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux enseignements MSOL.
- Hypothèse EMV12 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux enseignements MAPP.

18.4.4.2 Variables intrinsèques

- Hypothèse EMV13 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux enseignements PCAT.
- Hypothèse EMV14 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux enseignements AMEC.
- Hypothèse EMV15 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux enseignements ALGO.
- Hypothèse EMV16 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à l'évolution des scores spatiaux.
- Hypothèse EMV17 : La stratégie de définition de la longueur totale est significativement différente au recueil 2 : un nombre plus important d'étudiants adopte une stratégie efficace.

18.4.5 Étude qualitative de la performance en modélisation volumique à partir de l'encodage d'un échantillon de vingt-huit vidéos (hypothèses EQMV)

Les vidéos donnent avoir l'activité des étudiants dont nous avons caractérisé le produit et certaines stratégies dans le chapitre 16. Nous souhaitons étudier si ces données permettent d'approfondir la relation entre performance en modélisation et stratégies de modélisation. Pour cela, nous allons nous pencher sur certains indicateurs de performance et vérifier si et comment ils affectent l'évolution de la justesse de la modélisation suite aux enseignements du premier semestre.

18.4.5.1 Performance

- Hypothèse EQMV1 : La performance est liée au nombre d'actions avortées.
- Hypothèse EQMV2 : La performance est liée au nombre de messages d'erreurs.
- Hypothèse EQMV3 : La performance est liée à la capacité à factoriser certaines actions.
- Hypothèse EQMV4 : La performance est liée au nombre d'actions.
- Hypothèse EQMV5 : La performance est liée au temps de réalisation.

18.4.5.2 Évolution

- Hypothèse EQMV6 : Les scores de l'exercice de modélisation ont progressé significativement à la deuxième prise de données.
- Hypothèse EQMV7 : Les étudiants sont plus rapides au deuxième recueil.
- Hypothèse EQMV8 : Les étudiants réalisent moins d'actions au deuxième recueil.
- Hypothèse EQMV9 : Les étudiants sont plus efficaces au deuxième recueil.
- Hypothèse EQMV10 : Les étudiants tâtonnent plus au deuxième recueil.

Chapitre 19. Lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles

Dans ce chapitre nous allons éprouver les hypothèses HS1-HS14 explorant la relation entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles, ainsi que la relation entre performance aux tests spatiaux et stratégies de résolution. Les hypothèses HS1-HS9 concernent les variables extrinsèques à notre mesure de l'habileté spatiale :

- genre ;
- formation ;
- prévalence manuelle ;
- nombre de langues maternelles ;
- pratique de logiciels de modélisation ;
- nombre de logiciels de modélisation pratiqués ;
- pratique régulière de loisirs dans l'enfance et l'adolescence ;
- pratique régulière de loisirs à l'âge adulte ;
- performance en anglais.

Les hypothèses HS10-HS14 concernent les variables intrinsèques à notre mesure :

- nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux ;
- combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux ;
- changement de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux.

Nous vérifierons d'abord la normalité de la distribution des scores des tests spatiaux afin d'orienter le choix des tests statistiques pertinents pour éprouver nos hypothèses. La procédure sera décrite à l'introduction d'un test statistique, et ne le sera plus pour les références suivantes à ce test. Le logiciel utilisé pour réaliser les traitements statistiques est IBM SPSS Statistics (version 28).

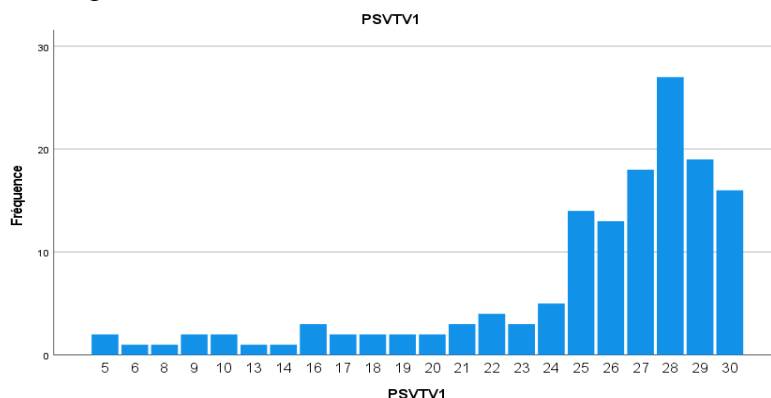
La synthèse des résultats de ces traitements statistiques se trouve paragraphe 19.16, p. 211.

19.1 Vérification de la normalité

Nous allons dans un premier temps décrire la distribution des tests et vérifier la normalité de la distribution des scores à l'aide du test de Shapiro-Wilk appliqué à la moyenne (Shapiro et Wilk, 1965). Un résultat significatif signifie que nous pouvons rejeter l'hypothèse selon laquelle la distribution des scores obtenus à un test suit la loi normale.

Pour le PSVT:V1, les 144 étudiants présents ont produit des scores s'étalant de 5 à 30, dont la moyenne est de 25,10 et l'écart-type de 5,56. L'ensemble des statistiques descriptives se trouve dans le tableau 50. Le test de Shapiro-Wilk appliqué à la moyenne des scores présente un résultat très significatif $p < 0,001$, comme décrite dans le tableau 51. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse selon laquelle la distribution des scores obtenus au PSVT:V1 suit la loi normale. Ce résultat est illustré dans la figure 55 qui décrit la distribution des scores du PSVT:V1 qui montre un étalement des scores compris faibles et moyens et une concentration des scores en 25 et 30.

Figure 55. Distribution des scores du PSVT:V1



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, PSVT:V1 = scores obtenus au PSVT:V au premier recueil. Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique. On observe un étalement important des scores faibles et moyens alors que la distribution des scores entre 25 et 30 semble normale.

Tableau 50. Statistiques descriptives du PSVT:V1

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
PSVT:V1	144	5	30	25,10	5,557

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = score le plus faible observé, Maximum = score le plus élevé observé, Moyenne = moyennes des scores observé, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs. Ce tableau présente la tendance centrale et l'étendu des scores du PSVT:V1.

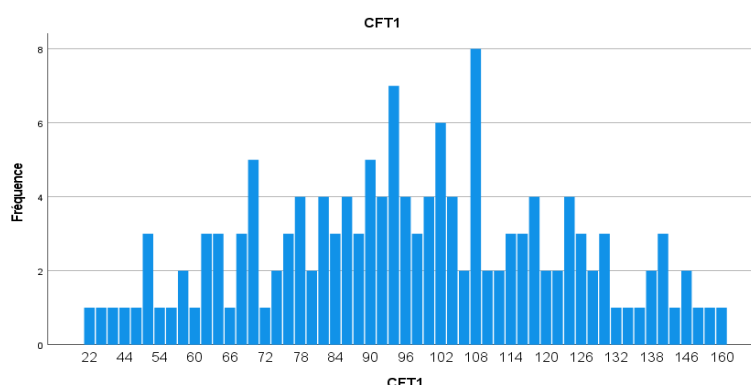
Tableau 51. Résultats du test de normalité du PSVT:V1

	Shapiro-Wilk		
	W	dl	p
PSVT:V1	0,751	144	0,000

Légende. W = statistique du test de Shapiro-Wilk ; dl = degré de liberté, p = valeur de p. Ce tableau indique le résultat du test, le degré de liberté et la significativité du résultat pour les scores du PSVT:V1.

Les résultats du test de Shapiro-Wilk pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 sont très significatifs, ce qui indique que leur distribution ne suit pas la loi normale. Les distributions sont illustrées dans les figures A1, A2 et A3 en annexe. Le résultat pour les scores du CFT1 indique un résultat non significatif, ce qui indique que leur distribution suit la loi normale, illustrée figure 56. L'ensemble de ces résultats et des statistiques descriptives est repris dans le tableau 52.

Figure 56. Distribution des scores du CFT1



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil.
Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.
On observe une distribution normale.

Tableau 52. Récapitulatif des statistiques descriptives et tests de normalité des tests spatiaux

Test	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	W	p
PSVT:V1	144	5	30	25,10	5,56	0,751	0,000
R PSVT:R1	146	8	30	25,31	4,06	0,875	0,000
MRT1	146	0	20	12,55	4,42	0,959	0,000
MCT1	146	3	25	16,16	5,13	0,961	0,000
CFT1	146	22	160	96,52	26,96	0,995	0,896

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = score le plus faible observé, Maximum = score le plus élevé observé, Moyenne = moyenne des scores observés, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs ; W = statistique du test de Shapiro-Wilk ; p = valeur de p

Ce tableau présente les statistiques descriptives et les résultats du test de Shapiro-Wilk pour les cinq tests spatiaux.

Compte tenu des résultats du test de Shapiro-Wilk pour les tests spatiaux, nous allons utiliser les tests paramétriques pour les hypothèses relatives au CFT1 et non-paramétriques pour les hypothèses relatives au PSVT:V1, au R PSVT:R1, au MRT1 et au MCT1.

19.2 Hypothèse Habileté Spatiale 1 (HS1) : La performance aux tests spatiaux est liée au genre

Selon la littérature de recherche sur l'habileté spatiale, cette habileté, telle que mesurée par les tests spatiaux, serait liée au genre (Cooke-Simpson et Voyer, 2007, p. 184; Maeda et Yoon, 2013, p. 87). Afin de vérifier cette hypothèse pour notre échantillon, nous souhaitons déterminer s'il existe une différence observable significative dans la distribution des scores obtenus aux tests spatiaux selon le genre. Pour ce faire, nous optons pour le test de Student pour échantillons indépendants (Student, 1908) pour les distributions suivant la loi normale, i.e. celles du CFT1, et son équivalent non-paramétrique, le test U de Mann-Whitney (Mann et Whitney, 1947), pour les distributions des tests qui ne suivent pas la loi normale, i.e. celles du PSVT:V1, du R PSVT:R1, du MRT1 et du MCT1.

Nous vérifions qu'il n'y a pas de valeurs éloignées à écarter pour la distribution du CFT1 (Kinnear et Gray, 2015, p. 168).

L'échantillon est composé de $N_F = 37$ [18,75%] femmes et $N_H = 117$ [81,25%] hommes.

Le test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1 et le genre indique un résultat très significatif $U = 2077,0$; $p = 0,010$, décrit dans le tableau 53.

Tableau 53. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney – PSVT:V1 et genre

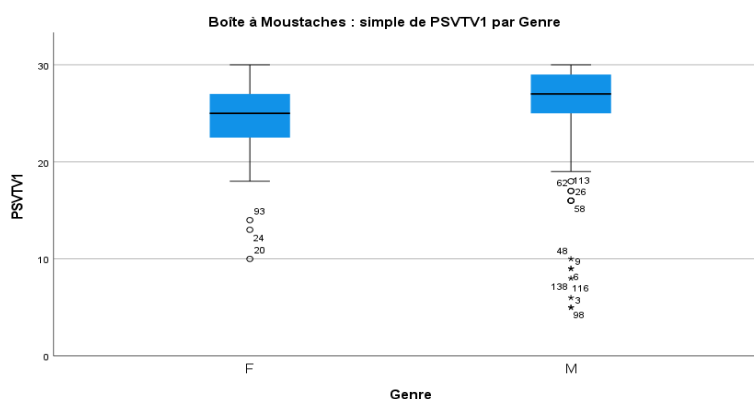
N	144
U de Mann-Whitney	2077,000
p	0,010

Légende. N = nombre d'étudiants, p = valeur de p .

Ce tableau indique le résultat du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1 et le genre, le degré de liberté et la significativité du résultat.

Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle. Il existe une différence de performance entre les hommes et les femmes de notre échantillon pour le PSVT:V1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des femmes et des hommes pour le PSVT:V1 montrent un résultat significatif en faveur des hommes, illustré figure 57.

Figure 57. Distribution du PSVT:V1 selon le genre



Légende. F = femmes, M = hommes, PSVT:V1 = scores du PSVT:V au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V1 des hommes et des femmes.

Les scores des hommes sont plus élevés que ceux des femmes mais aussi plus écartés. D'autre part, un groupe d'hommes obtient des résultats beaucoup plus faibles que l'ensemble des sujets.

Le test de Mann-Whitney le genre indique un résultat non significatif pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats des scores des quatre tests ne suivant pas la loi normale sont présentés tableau 54.

Tableau 54. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le genre

Test	N	U	p
PSVT:V1	144	2077,0	0,010
R PSVT:R1	146	1977,5	0,060
MRT1	146	1797,5	0,334
MCT1	146	1801,5	0,325

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le genre, ainsi que la significativité du résultat.

Nous ne pouvons donc pas mettre en évidence de différence de performance entre les hommes et les femmes de notre échantillon pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

Le test de Student pour le CFT1 et le genre indique un résultat très significatif $t(144) = -2,36$; $p = 0,020$ décrit dans le tableau 55. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle. Il existe une différence de performance entre les hommes et les femmes de notre échantillon pour le CFT1.

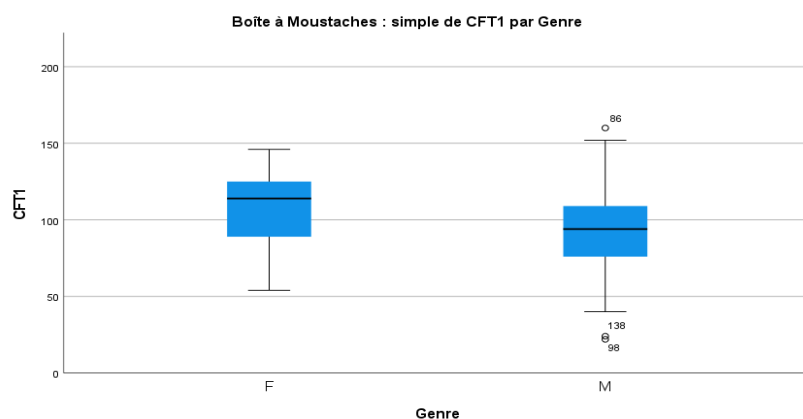
Tableau 55. Test t des échantillons indépendants – CFT1 et genre

Test	N	t	dl	p
CFT1	144	-2,36	144	0,020

Légende. N = nombre d'étudiants, t = valeur du résultat du test de Student, dl = degré de liberté, p = valeur de p . Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le CFT1 et le genre et la significativité du résultat.

Les boîtes à moustaches, illustrées dans la figure 58, illustrant la distribution des femmes et des hommes pour le CFT1 montrent un résultat significatif en faveur des femmes.

Figure 58. Distribution du CFT1 selon le genre



Légende. F = femmes, M = hommes, CFT1 = scores du CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des hommes et des femmes, dont les scores sont plus élevés et plus resserrés que ceux des hommes.

19.3 Hypothèse HS2 : Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux aux tests spatiaux que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques

Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour le test de Student pour échantillons indépendants pour le CFT1, et son équivalent non-paramétrique, le test U de Mann-Whitney, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 dont les résultats sont décrits dans le tableau A18 en annexe.

Les résultats des tests de Mann-Whitney ne sont pas significatifs pour les quatre tests respectant la loi normale. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants issus de formations technologiques et les autres étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

Le test de Student indique un résultat non significatif pour la spécialisation technologique et la performance au CFT1 : $t(144) = -0,76$; $p = 0,224$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants issus de formations technologiques et les autres étudiants de notre échantillon pour le CFT1.

19.4 Hypothèse HS3 : La performance aux tests spatiaux est liée à la prévalence manuelle

Selon la littérature de recherche sur l'habileté spatiale, l'habileté spatiale, telle que mesurée par les tests spatiaux, est liée à la prévalence manuelle (Guay et McDaniel, 1978, p. 96; Somers *et al.*, 2015, p. 41). Afin de vérifier cette hypothèse pour notre échantillon, nous souhaitons déterminer s'il existe une différence observable significative dans la distribution des scores obtenus aux tests spatiaux selon la prévalence manuelle. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour une analyse de variance (ANOVA) pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis (Kruskal et Wallis, 1952), pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

Pour le PSVT:V1, le test de Kruskal-Wallis indique un résultat non significatif : $\chi^2(2) = 2,30$; $p = 0,316$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les gauchers, les droitiers et les ambidextres de notre échantillon pour le PSVT:V1.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la prévalence manuelle sont décrits dans le tableau A19, en annexe. Les résultats du test ne sont pas significatifs pour le R PSVT:R1, le MCT1 et le MRT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les gauchers, les droitiers et les ambidextres de notre échantillon pour le R PSVT:R1, le MCT1 et le MRT1.

Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat non significatif : $F(2,143) = 1,33$; $p = 0,268$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les gauchers, les droitiers et les ambidextres de notre échantillon pour le CFT1.

19.5 Hypothèse HS4 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles

Le nombre de langues maternelles relevé dans notre échantillon n'excède pas deux. Nous optons pour le test de Student pour échantillons indépendants pour le CFT1, et le test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats des tests U de Mann-Whitney sont présentés dans le tableau 56.

Tableau 56. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de langues maternelles

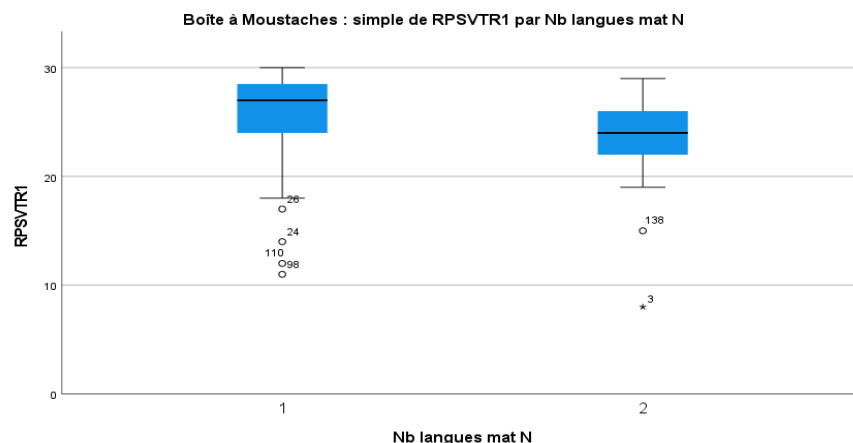
Test	N	U	p
PSVT:V1	140	963,0	0,053
R PSVT:R1	141	853,0	0,009
MRT1	141	1071,0	0,175
MCT1	141	971,5	0,055

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la filière d'origine et la significativité du résultat.

Il indique aussi un résultat très significatif pour le R PSVT:R1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des étudiants selon le nombre de langues maternelles pour le R PSVT:R1 montrent un résultat très significatif en faveur des étudiants possédant une langue maternelle, illustré dans la figure 59.

Figure 59. Distribution du R PSVT:R1 selon le nombre de langues maternelles



Légende. 1 = une langue maternelle, 2 = deux langues maternelles.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants ayant appris une ou deux langues maternelles. Les scores des étudiants ayant appris une langue maternelle sont plus élevés et plus écartés que ceux qui en ont appris deux.

Le test de Mann-Whitney indique un résultat faiblement significatif pour le nombre de langues maternelles et la performance au PSVT:V1 et au MCT1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des étudiants selon le nombre de langues maternelles pour le PSVT:V1, figure A4 en annexe, montrent un résultat en faveur des étudiants possédant une langue maternelle. Il en est de même pour le MCT1 dont les boîtes à moustaches sont illustrées dans la figure A5 en annexe.

Les résultats du test U de Mann-Whitney ne sont pas significatifs pour le MRT1. Le test de Student indique un résultat non significatif pour le nombre de langues maternelles et la performance au CFT1 : $t(139) = 0,70$; $p = 0,488$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants possédant une langue maternelle et les étudiants possédant deux langues maternelles de notre échantillon pour le MRT1 et le CFT1.

19.6 Hypothèse HS5 : La performance aux tests spatiaux est liée à la pratique de logiciels de modélisation

La revue de littérature relève plusieurs études (Martín-Dorta *et al.*, 2008, p. 509; Sorby, 1999b, p. 4.465.2) établissant l'efficacité de la pratique de modèles volumiques sur l'amélioration de l'habileté spatiale. Nous nous posons la question de savoir s'il existe une différence entre les étudiants de notre échantillon ayant pratiqué un ou des modèles volumiques et les étudiants sans pratique. Les résultats du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 sont présentés dans le tableau 57.

Tableau 57. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la pratique de logiciels de modélisation

Test	N	U	p
PSVT:V1	144	1466,5	0,188
R PSVT:R1	146	1638,5	0,030
MRT1	146	1416,0	0,372
MCT1	146	1753,0	0,005

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la pratique de logiciels de modélisation et la significativité du résultat.

Le test de Mann-Whitney indique un résultat significatif pour le R PSVT:R1 et un résultat très significatif pour le MCT1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des étudiants selon la pratique de logiciels, présentées dans les figures A6 et A7 en annexe, montrent un résultat en faveur des étudiants avec pratique.

Les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1 et le MRT1 et du test de Student pour le CFT1, $t(144) = -1,21$; $p = 0,225$, ne sont pas significatifs. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre étudiants ayant pratiqué un ou des modèles volumiques et les étudiants sans pratique de notre échantillon pour le PSVT:V1, le MRT1 et le CFT1.

19.7 Hypothèse HS6 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de logiciels de modélisation volumique pratiqués

Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1 et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats sont décrits dans le tableau 58.

Tableau 58. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués

Test	<i>N</i>	$\chi^2(4)$	<i>p</i>
PSVT:V1	144	7,22	0,125
R PSVT:R1	146	9,48	0,050
MRT1	146	2,48	0,649
MCT1	146	9,89	0,042

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués et la significativité du résultat.

Les résultats des tests sont faiblement significatifs pour le R PSVT:R1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des étudiants selon le nombre de logiciels pratiqués pour le R PSVT:R1 semble indiquer une performance croissante en fonction du nombre de logiciels, voir figure A8 en annexe.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis est significatif pour le MCT1. Les boîtes à moustaches illustrant la distribution des catégories d'étudiants selon le nombre de logiciels pratiqués pour le MCT1, figure A9 en annexe, semblent décrire une performance croissante en fonction du nombre de logiciels, à l'exception de l'étudiant ayant pratiqué 4 logiciels. Si l'on écarte l'étudiant ayant pratiqué quatre logiciels, on obtient un résultat significatif $\chi^2(3) = 9,83$; *p* = 0,20 et les boîtes à moustaches révèlent une performance au MCT1 croissante en fonction du nombre de logiciels.

Le résultat de l'ANOVA pour le CFT1 et le nombre de logiciels n'est pas significatif : $F(4,141) = 0,695$; *p* = 0,597. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants de notre échantillon selon le nombre de modeleurs volumiques pratiqués pour le PSVT:V1, le MRT1 et le CFT1.

19.8 Hypothèse HS7 : La performance spatiale est liée à la pratique de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence

Selon la littérature de recherche sur l'habileté spatiale, l'habileté spatiale, telle que mesurée par les tests spatiaux, est liée aux pratiques de loisirs de l'enfance (Gold *et al.*, 2018, p. 10; Górska *et al.*, 1998, p. 13). Afin de vérifier cette hypothèse pour notre échantillon, nous souhaitons déterminer s'il existe une différence observable significative dans la distribution des scores obtenus aux tests spatiaux selon les loisirs. Les réponses au questionnaire Loisirs pratiqués durant l'enfance et l'adolescence ont été encodées pour produire des catégories d'étudiants regroupés selon la nature de leurs loisirs, le nombre de loisirs de même nature pratiqués et la fréquence à laquelle ces loisirs ont été pratiqués (cette méthodologie est décrite dans le chapitre 15). Ces douze catégories ont été regroupées selon la dimension dynamique (notée DEP), manipulatoire (notée M), 2D (notée 2D), construction 3D (notée C3D), et artistique (notée ART) qui les caractérisent selon notre encodage. Pour chaque dimension, le nombre de ces catégories est supérieur à deux. Nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1 et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivis des résultats des loisirs manipulateurs, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

19.8.1 Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les vingt-sept catégories dynamiques (DEP) possibles, seize sont mobilisées. La distribution des catégories DEP est présentée dans le tableau 59.

Tableau 59. Table de fréquence des catégories DEP – Enfance et adolescence ($N = 146$)

	DEPP0A	DEPP0E	DEPP0H	DEPP0K	DEPP0L	DEPP0N	DEPP0O	DEPP1A	DEPP1B	DEPP1C	DEPP1E	DEPP1F	DEPP2B	DEPP2C	DEPP2E	DEPP2F	Total
n	2	1	1	17	5	5	7	2	35	16	4	5	15	21	5	5	146
%	1,4	0,7	0,7	11,6	3,4	3,4	4,8	1,4	24,0	11,0	2,7	3,4	10,3	14,4	3,4	3,4	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories DEP dans l'enfance et l'adolescence. Les catégories à fort effectif e.g. DEPP0K, DEPP1B, DEPP2C, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs dynamiques dans l'enfance.

Les résultats du test de de Kruskal-Wallis sont regroupés dans le tableau 60.

Tableau 60. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 et les catégories DEPP mettant en regard la performance spatiale et les loisirs de déplacement

Test	N	$\chi^2 (15)$	p
PSVT:V1	144	23,03	0,083
R PSVT:R1	146	30,61	0,010
MRT1	146	30,53	0,010
MCT1	146	25,65	0,042

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs dynamiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et la significativité du résultat.

Le test de de Kruskal-Wallis indique un résultat très significatif pour le R PSVT:R1 et le MRT1, un résultat significatif pour le MCT1.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A10 en annexe, pour le R PSVT:R1 semble indiquer une performance dans l'ensemble croissante de la performance à ce test en fonction d'une pratique plus fréquente de loisirs dynamiques.

L'observation des boîtes à moustaches, , illustrées dans la figure A11 en annexe, pour le MRT1 semble indiquer une performance plus élevée à ce test pour les étudiants ayant pratiqué modérément et fortement les loisirs dynamiques dans l'enfance.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A12 en annexe, pour le MCT1 semble indiquer une performance plus élevée à ce test pour les étudiants ayant pratiqué un nombre modéré ou élevé de loisirs dynamiques dans l'enfance.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1 n'est pas significatif. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat non significatif : $F(15,130) = 1,64$; $p = 0,072$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques dynamiques entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1 et le CFT1.

19.8.2 Loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les vingt-sept catégories manipulatoires (M) possibles, dix-neuf sont mobilisées. La distribution des catégories M est présentée dans le tableau 61.

Tableau 61. Table de fréquence des catégories M – Enfance et adolescence ($N = 146$)

	MR0A	MR0J	MR0K	MR0L	MR0M	MR0N	MR0O	MR1A	MR1B	MR1C	MR1D	MR1E	MR1F	MR2A	MR2B	MR2C	MR2D	MR2E	MR2F	Total
<i>n</i>	2	1	14	12	1	9	5	5	13	5	7	12	4	3	26	8	2	11	6	146
%	1,4	0,7	9,6	8,2	0,7	6,2	3,4	3,4	8,9	3,4	4,8	8,2	2,7	2,1	17,8	5,5	1,4	7,5	4,1	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories M dans l'enfance et l'adolescence. Les catégories à fort effectif e.g. MR0K, MR1B, MR2B, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, et le MCT1 et un résultat très significatif pour le MRT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 62.

Tableau 62. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs manipulatoires

Test	<i>N</i>	χ^2 (18)	<i>p</i>
PSVT:V1	144	30,92	0,029
R PSVT:R1	146	29,70	0,040
MRT1	146	35,42	0,008
MCT1	146	29,70	0,040

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et la significativité du résultat.

Il existe une différence de performance liée aux pratiques manipulatoires entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans les figures A13 et A14 en annexe, pour le PSVT:V1 et le R PSVT:R1 semble indiquer une performance dans l'ensemble croissante de la performance à ces tests en fonction d'une pratique plus fréquente de loisirs manipulatoires.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans les figures A15 et A16 en annexe, pour le MCT1 et MRT1 semble indiquer une meilleure performance au MCT1 pour les étudiants ayant pratiqué un nombre modéré et élevé de loisirs manipulateurs dans l'enfance et l'adolescence.

L'ANOVA indique un résultat non significatif pour la catégorie de loisirs avec manipulation et la performance au CFT1 : $F(18,127) = 1,11$; $p = 0,347$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques manipulateurs entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1.

19.8.3 Loisirs en 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories 2D possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories 2D est présentée tableau 63.

Tableau 63. Table de fréquence des catégories 2D – Enfance et adolescence ($N = 146$)

	2D0A	2D0B	2D0C	2D1B	2D1C	2D2B	2D2C	Total
n	2	26	15	21	58	4	20	146
%	1,4	17,8	10,3	14,4	39,7	2,7	13,7	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories 2D dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif e.g. 2D0B, 2D1C, 2D2C, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 64.

Tableau 64. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs 2D

Test	N	$\chi^2(6)$	p
PSVT:V1	144	8,51	0,203
R PSVT:R1	146	9,27	0,159
MRT1	146	9,60	0,143
MCT1	146	9,67	0,139

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et la significativité du résultat.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée à la pratique de loisirs en 2D entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, pour le MRT1 et pour le MCT1.

L'ANOVA indique un résultat significatif pour la catégorie de loisirs en 2D et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 2,60$; $p = 0,020$. Il existe une différence de performance liée aux pratiques

en 2D entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1. L'observation des boîtes à moustaches, , illustrées dans la figure A17 en annexe, semble indiquer une progression croissante selon l'augmentation de la fréquence de la pratique des loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence.

19.8.4 Loisirs avec construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories construction 3D (C3D) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories C3D est présentée tableau 65.

Tableau 65. Table de fréquence des catégories C3D – Enfance et adolescence ($N = 146$)

	C3D0A	C3D0B	C3D0C	C3D1B	C3D1C	C3D2B	C3D2C	Total
n	2	14	8	40	40	9	33	146
%	1,4	9,6	5,5	27,4	27,4	6,2	22,6	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories C3D dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif e.g. C3D1B, C3D2C, concernent des catégories de pratique modérée et élevée de loisirs de construction dans l'enfance et l'adolescence.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat très significatif pour le MCT1 et un résultat non significatif pour le R PSVT:R1, le PSVT:V1, et le MRT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 66.

Tableau 66. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs de construction

Test	N	$\chi^2(6)$	p
PSVT:V1	144	8,91	0,179
R PSVT:R1	146	10,77	0,096
MRT1	146	9,99	0,125
MCT1	146	17,32	0,008

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs de construction pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et la significativité du résultat.

L'observation des boîtes à moustaches, , illustrées dans la figure A18 en annexe, pour le MCT1 semble indiquer une performance croissant avec l'augmentation de la fréquence de la pratique de loisirs de construction en 3D dans l'enfance et l'adolescence.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques avec construction en 3D entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et pour le MRT1.

L'ANOVA indique un résultat significatif pour la catégorie de loisirs avec construction 3D et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 2,37$; $p = 0,033$. Il existe une différence de performance

liée aux pratiques avec construction 3D entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A19 en annexe, semble indiquer une performance au CFT1 augmentant avec la fréquence de la pratique de loisirs de construction en 3D dans l'enfance et l'adolescence.

19.8.5 Loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories artistiques (ART) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories ART est présentée tableau 67.

Tableau 67. Table de fréquence des catégories ART – Enfance et adolescence ($N = 146$)

	ART0A	ART0B	ART0C	ART1B	ART1C	ART2B	ART2C	Total
n	2	18	13	33	38	15	27	146
%	1	12	8	22	26	10	18	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories ART dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif e.g. ART1B, ART2C, concernent des catégories de pratique modérée et élevée de loisirs artistiques dans l'enfance et l'adolescence.

Le test de Kruskal-Wallis indique des résultats non significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 68.

Tableau 68. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs artistiques

Test	N	$\chi^2(6)$	p
PSVT:V1	144	7,20	0,302
R PSVT:R1	146	10,11	0,120
MRT1	146	12,02	0,062
MCT1	146	8,34	0,214

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et la significativité du résultat.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques avec construction en 3D entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le MRT1, le R PSVT:R1 et pour le MCT1.

L'ANOVA indique un résultat non significatif pour la catégorie de loisirs artistiques et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 2,01$; $p = 0,068$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques artistiques entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1.

19.9 Hypothèse HS8 : La performance spatiale est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données

La méta-analyse d'Uttal *et al.* (2013) établit que l'habileté spatiale était malléable et suggère qu'elle l'est à tout âge (p. 366). Nous investiguons donc la relation entre scores spatiaux et pratique contemporaine des loisirs pour voir si la performance aux tests spatiaux peut être liée aux loisirs pratiqués à l'âge adulte. Le nombre de catégories de loisirs étant supérieure à deux, nous optons à nouveau pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivis des résultats des loisirs manipulateurs, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

19.9.1 Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués à l'âge adulte

Parmi les vingt-sept catégories dynamiques (DEP) possibles, treize sont mobilisées. La distribution des catégories DEP est présentée dans le tableau 69.

Tableau 69. Table de fréquence des catégories DEP – Âge adulte ($N = 146$)

	DEPP20A	DEPP20B	DEPP20E	DEPP20F	DEPP20J	DEPP20K	DEPP20N	DEPP21A	DEPP21B	DEPP21C	DEPP21E	DEPP22B	DEPP22F	Total
<i>n</i>	1	6	13	1	3	45	10	3	49	2	3	9	1	146
%	0,7	4,1	8,9	0,7	2,1	30,8	6,8	2,1	33,6	1,4	2,1	6,2	0,7	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories DEP à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif e.g. DEPP20K, DEPP21B, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs dynamiques à l'âge adulte.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat significatif pour le R PSVT:R1 et le MCT1 et un résultat non significatif pour le PSVT:V1 et le MRT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques dynamiques entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1 et le MRT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 70.

Tableau 70. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs dynamiques

Test	<i>N</i>	χ^2 (12)	<i>p</i>
PSVT:V1	144	16,87	0,155
R PSVT:R1	146	12,76	0,047
MRT1	146	30,53	0,387
MCT1	146	21,47	0,044

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte et la significativité du résultat.

L'observation des boîtes à moustaches pour le R PSVT:R1, illustrées dans la figure A20 en annexe, semble indiquer des performances supérieures à ce test pour des catégories de fréquence de pratique de loisirs dynamiques modérée et élevée.

L'observation des boîtes à moustaches pour le MCT1, illustrées dans la figure A21 en annexe, semble indiquer et les faibles effectifs de certaines catégories ne nous permettent d'interpréter ce résultat, avec cependant un décrochage pour deux catégories de fréquence modérée (DEPP20J *n* = 3 ; DEPP20N *n* = 10) qui pourrait expliquer la significativité du résultat.

Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat très significatif : $F(12,133) = 2,40$; $p = 0,008$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A22 en annexe, et les faibles effectifs de certaines catégories ne nous permettent d'interpréter ce résultat, avec cependant un décrochage de plusieurs catégories (DEPP20J *n* = 3 ; DEPP21E *n* = 3) qui pourrait expliquer la significativité du résultat.

19.9.2 Loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte

Parmi les vingt-sept catégories manipulatoires (M) possibles, seize sont mobilisées. La distribution des catégories M est présentée tableau 71.

Tableau 71. Table de fréquence des catégories M – Âge adulte (*N* = 146)

	MR20A	MR20B	MR20E	MR20J	MR20K	MR20L	MR20M	MR20N	MR20O	MR21A	MR21B	MR21C	MR21E	MR22C	MR22E	MR22F	Total
<i>n</i>	1	1	2	14	41	8	2	3	1	16	41	10	1	1	3	1	146
%	0,7	0,7	1,4	9,6	28,1	5,5	1,4	2,1	0,7	11	28,1	6,8	0,7	0,7	2,1	0,7	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories M à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif e.g. MR20K, MR21A, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs manipulatoires à l'âge adulte.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat significatif pour le R PSVT:R1 et un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 72.

Tableau 72. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs manipulatoires

Test	<i>N</i>	χ^2 (15)	<i>p</i>
PSVT:V1	144	22,71	0,090
R PSVT:R1	146	30,26	0,011
MRT1	146	16,12	0,374
MCT1	146	19,59	0,188

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte et la significativité du résultat.

L'observation des boîtes à moustaches pour le R PSVT:R1, illustrées dans la figure A23 en annexe, semble indiquer une performance variable selon la catégorie de fréquence de la pratique de loisirs manipulatoires, avec un décrochage de plusieurs catégories (MR20E *n* = 2 ; MR20M *n* = 2 ; MR20L *n* = 8) qui pourrait expliquer la significativité du résultat.

L'ANOVA indique un résultat non significatif pour la catégorie de loisirs avec manipulation et la performance au CFT1 : $F(15,130) = 1,60$; $p = 0,081$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au CFT1 liée aux loisirs à pratique manipulative entre les étudiants de notre échantillon.

19.9.3 Loisirs en 2D pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories 2D (2D) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories 2D est présentée tableau 73.

Tableau 73. Table de fréquence des catégories 2D – Âge adulte (*N* = 146)

	2D20A	2D20B	2D20C	2D21B	2D21C	2D22B	2D22C	Total
<i>n</i>	1	79	20	20	20	1	5	146
%	0,7	54,1	13,7	13,7	13,7	0,7	3,4	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories 2D à l'âge adulte. La catégorie à fort effectif i.e. 2D20B concerne une catégorie de pratique faible de loisirs 2D à l'âge adulte.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 74.

Tableau 74. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs 2D

Test	<i>N</i>	χ^2 (6)	<i>p</i>
PSVT:V1	144	2,38	0,882
R PSVT:R1	146	3,124	0,793
MRT1	146	5,69	0,669
MCT1	146	4,06	0,669

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte et la significativité du résultat.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de performance liée aux pratiques en 2D entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, pour le MRT1 et pour le MCT1.

L'ANOVA indique un résultat non significatif pour la catégorie de loisirs en 2D et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 0,93$; $p = 0,476$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques en 2D entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1.

19.9.4 Loisirs avec construction 3D pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories construction 3D (C3D) possibles, six sont mobilisées. La distribution des catégories C3D est présentée tableau 75.

Tableau 75. Table de fréquence des catégories C3D – Âge adulte (*N* = 146)

	C3D20A	C3D20B	C3D20C	C3D21B	C3D21C	C3D22C	Total
<i>n</i>	1	115	17	8	4	1	146
%	0,7	78,8	11,6	5,5	2,7	0,7	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories C3D à l'âge adulte.

La catégorie à fort effectif i.e. C3D20B concerne une catégorie de pratique faible de loisirs C3D à l'âge adulte.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat significatif pour le PSVT:V1 et un résultat non significatif pour le de R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 76.

Tableau 76. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs de construction

Test	<i>N</i>	$\chi^2(5)$	<i>p</i>
PSVT:V1	144	12	0,035
R PSVT:R1	146	8,51	0,130
MRT1	146	6,16	0,291
MCT1	146	4,58	0,469

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs de construction pratiqués à l'âge adulte et la significativité du résultat.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figure A24 en annexe, pour le PSVT:V1 est difficile à interpréter en raison des faibles effectifs des catégories à l'exception de la catégorie C3D20B à faible pratique de loisirs manipulatoires (*n* = 115). Il semblerait que les loisirs manipulatoires soient peu pratiqués par notre échantillon à l'âge adulte. La catégorie obtenant la meilleure performance, la catégorie C3D20C (*n* = 17) est caractérisée par un nombre de loisirs à faible pratique de loisirs de construction élevé.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques avec construction en 3D entre les étudiants de notre échantillon pour le R PSVT:R1, pour le MRT1 et le MCT1.

L'ANOVA indique un résultat significatif pour la catégorie de loisirs avec construction 3D et la performance au CFT1 : $F(5,140) = 2,50$; $p = 0,033$. Comme pour le PSVT:V1, l'observation des boîtes à moustaches, illustrées figure A25 en annexe, est difficile : la catégorie obtenant la meilleure performance, la catégorie C3D20C (*n* = 17), est caractérisée par un nombre élevé de loisirs non liés à la construction C3D.

19.9.5 Loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories artistiques (ART) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories ART est présentée tableau 77.

Tableau 77. Table de fréquence des catégories ART – Âge adulte (*N* = 146)

	ART20A	ART20B	ART20C	ART21B	ART21C	ART22B	ART22C	Total
<i>n</i>	1	57	2	71	6	7	2	146
%	0,7	39,0	1,4	48,6	4,1	4,8	1,4	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories ART à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif e.g. ART20B, ART21B, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs artistiques à l'âge adulte.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 78.

Tableau 78. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les loisirs artistiques

Test	<i>N</i>	χ^2 (6)	<i>p</i>
PSVT:V1	144	5,96	0,428
R PSVT:R1	146	2,75	0,840
MRT1	146	3,93	0,686
MCT1	146	1,782	0,939

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte et la significativité du résultat.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de performance liée aux pratiques artistiques entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

L'ANOVA indique un résultat non significatif pour la catégorie de loisirs artistiques et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 2,86$; $p = 0,524$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques artistiques entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1.

19.10 Hypothèse HS9 : la performance spatiale est liée au niveau d'anglais

Pour tester cette hypothèse, nous allons vérifier s'il existe une association linéaire entre les scores du test d'anglais, une version abrégée du TOEIC, que les étudiants ont passé à leur arrivée et les scores des tests spatiaux. Nous optons pour la corrélation de Pearson (1895) pour le test dont la distribution suit la loi normale, i.e. le CFT1, et son équivalent non-paramétrique, la corrélation de Spearman, pour les distributions des tests qui ne suivent pas la loi normale i.e. celles du PSVT:V1, du R PSVT:R1 du MRT1 et du MCT1, dont les résultats sont décrits dans le tableau 79.

Tableau 79. Corrélation de Spearman pour les scores TOEIC et les scores du PSVT:V1, du R PSVT:R1, du MRT1 et du MCT1

Variable dépendante	Variable dépendante	<i>r_s</i>	<i>N</i>
Score TOEIC	PSVT:V1	0,137	144
	R PSVT:R1	0,163*	146
	MRT1	0,052	146
	MCT1	0,099	146

Légende. *r_s* = coefficient de Spearman ; *N* = nombre d'étudiants

* $p < .05$; ** $p < .01$.

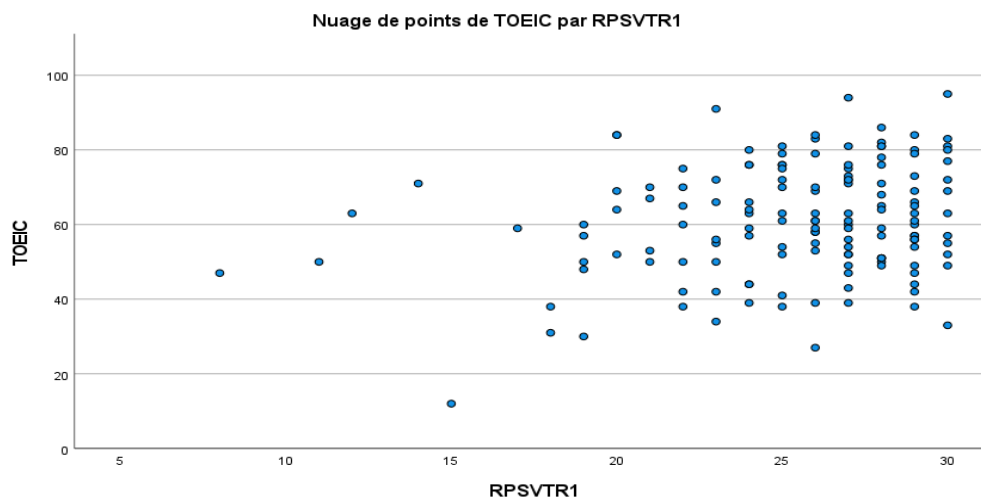
Ce tableau indique les résultats l'analyse de corrélation entre la performance au PSVT:V1, R PSVT:R1, MRT1 et MCT1 et la performance au test de positionnement d'anglais.

La corrélation de Pearson est significative pour le CFT1 : $r = 0,211$; $N = 146$; $p = 0,011$.

La corrélation de Spearman est significative pour le R PSVT:R1, mais ne l'est pas pour le PSVT:V1, le MRT1 et le MCT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée au niveau d'anglais entre les étudiants de notre échantillon pour le PSVT:V1, le MRT1 et le MCT1.

Nous vérifions les corrélations pour le R PSVT:R1 et le CFT1 à l'aide de nuages de points, illustrés figures 60 et 61, pour éviter une interprétation de corrélation significative erronée (Kinnear et Gray, 2015, p. 290).

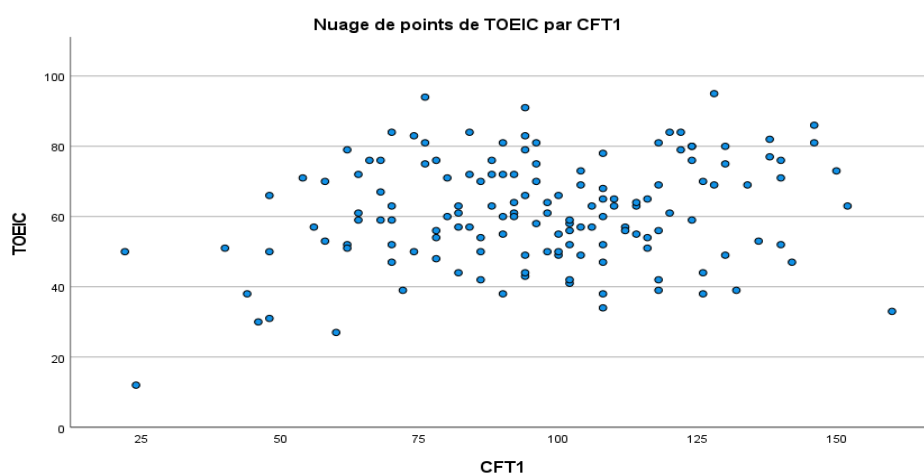
Figure 60. Nuage de points des scores de TOEIC et des scores de R PSVT:R1



Légende. TOEIC = scores du test de positionnement d'anglais ; RPSVTR1 = scores de R PSVT:R1. Ce diagramme illustre la dispersion des scores du TOEIC en fonction des scores du R PSVT:R1. La dispersion des points n'est pas concentrée sur la droite de corrélation.

La dispersion des points n'est pas concentrée sur la droite de corrélation. Nous observons des étudiants produisant des scores en anglais faibles et des scores de R PSVT:R1 élevés. Certains étudiants sont faibles en anglais et en R PSVT:R1. Nous ne pouvons pas retenir la corrélation entre scores au test de positionnement d'anglais et scores de R PSVT:R1.

Figure 61. Nuage de points des scores de TOEIC et des scores de CFT1



Légende. TOEIC = scores du test de positionnement d'anglais ; CFT1 = scores de CFT1. Ce diagramme illustre la dispersion des scores du TOEIC en fonction des scores du CFT1. On observe une relative concentration des valeurs autour de l'axe de corrélation.

On peut comprendre les corrélations significatives mais faibles entre performance au TOEIC et au CFT1 grâce aux nuages de points : les valeurs sont concentrées autour de l'axe de corrélation

avec cependant des variations importantes. Nous ne retenons pas cette corrélation en raison de la faiblesse de la corrélation et de la dispersion des points.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux liée à la performance au test de positionnement anglais.

19.11 Hypothèse HS10 : Les étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies dans un test.

Plusieurs études (Albaret et Aubert, 1996; Hegarty, 2018; Just et Carpenter, 1984; Pilardeau, 2008) ont montré que les sujets mobilisaient une pluralité de stratégies différentes pour résoudre les tâches présentées dans les tests visant à mesurer l'habileté spatiale. Nous souhaitons vérifier s'il en est de même pour notre échantillon.

Deux types de données peuvent être mobilisés pour éprouver cette hypothèse :

- les stratégies issues des verbatim Stratégies : les 3 réponses nous renseignent sur les 3 stratégies, qu'elles soient des stratégies uniques ou des séquences de stratégies, déclarées mobilisées pour ces trois questions ;
- les stratégies uniques issues du QCM Stratégies : les réponses concernent l'ensemble des stratégies uniques mobilisées dans un test.

Nous allons tester notre hypothèse à partir des stratégies extraites des verbatim, puis celles extraites des QCM.

19.11.1 Variable extraite à partir des verbatim Stratégies

L'encodage des verbatim au questionnaire ouvert Stratégies permet d'identifier les stratégies uniques ou combinaison de stratégies déclarées mobilisées par les étudiants dans les trois questions que nous avons sélectionnées. En comparant les réponses aux trois questions, on peut déterminer si une ou plusieurs stratégies sont décrites. Ci-dessous, la table de fréquence des stratégies identifiées dans le PSVT:V1 à partir de l'encodage des verbatim Stratégies, tableau 80, indique les stratégies mobilisées relevées dans les trois questions, le nombre et le pourcentage d'étudiants les ayant mobilisées.

Tableau 80. Liste des stratégies identifiées dans le PSVT:V1 à partir de l'encodage des verbatim Stratégies et leur fréquence

Combinaison	Code	PSVT:V1 Réponse 1		PSVT:V1 Réponse 2		PSVT:V1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et N1	N/A	1	1	3	2	4	3
M	2	0	0	0	0	2	1
MR	3	11	8	9	6	6	4
MRPA	4	4	3	3	2	4	3
MRPVO	5	0	0	0	0	1	1
MRSVPVO	6	1	1	0	0	0	0
PVO	7	54	37	50	34	54	37
PVOM	8	0	0	0	0	4	3
PVOMR	9	13	9	5	3	2	1
PVOMRPA	10	1	1	2	1	0	0
PVOPA	11	57	39	70	48	61	42
PVOPAM	12	0	0	0	0	3	2
PVOPAMR	13	3	2	3	2	4	3
PVOPAMRPA	14	1	1	0	0	0	0
PVOSVMRPA	15	0	0	1	1	0	0
RM	16	0	0	0	0	1	1
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les stratégies spécifiques à une question relevées dans le PSVT:V1 dans les verbatim Stratégies.

La table de fréquence des stratégies uniques ou combinaisons de stratégies identifiées à partir des verbatim permet de conclure que :

- il existe une pluralité de stratégies pour répondre aux questions du PSVT:V1 ;
- certaines stratégies sont spécifiques à certaines questions du PSVT:V1, e.g. la stratégie M n'est mobilisée que dans la question 3.

En comptant le nombre de stratégies mobilisées dans les trois questions que nous avons proposées aux étudiants, on peut déterminer le nombre de stratégies différentes. La table de fréquence 81 décrit la distribution pour le PSVT:V1 dans laquelle on peut observer que 53% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie. Les tables de fréquence des autres tests se trouvent dans le tableau A26 en annexe.

Tableau 81. Table de fréquence du nombre de stratégies uniques déclarées mobilisées dans le PSVT:V1 dans les verbatim Stratégies

Nombre de stratégies	<i>N</i>	%
1	67	46,9
2	65	45,5
3	11	7,7
Total	143	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le PSVT:V1 dans les verbatim Stratégies. 53% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie.

Nous pouvons conclure que :

- environ 53% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le PSVT:V1 ;
- environ 32% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le R PSVT:R1 ;
- environ 33% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le MRT1 ;
- environ 62% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le MCT1 ;
- environ 37,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le CFT1.

Les descriptives statistiques des cinq tests sont décrites dans le tableau 82 ci-dessous. Les étudiants mobilisent entre une et deux stratégies par test en moyenne.

Tableau 82. Descriptives statistiques du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim Stratégies

	Nombre de stratégies PSVT:V1	Nombre de stratégies R PSVT:R1	Nombre de stratégies MRT1	Nombre de stratégies MCT1	Nombre de stratégies CFT1
<i>N</i>	143	142	138	125	136
Moyenne	1,61	1,35	1,39	1,83	1,43
Médiane	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Écart type	0,628	0,533	0,597	0,759	0,605
Minimum	1	1	1	1	1
Maximum	3	3	3	3	3

Légende. *N* = nombre d'étudiants, Minimum = nombre de stratégies le plus faible observé, Maximum = nombre de stratégies le plus élevé observé, Moyenne = moyennes des stratégies observé, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs.

Ce tableau regroupe les statistiques descriptives du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux au premier recueil issu des verbatim Stratégies.

19.11.2 Variable extraite à partir des QCM Stratégies

L'encodage des réponses au QCM Stratégies permet d'identifier les stratégies, uniques ou faisant partie d'une séquence, déclarées mobilisées par les étudiants, à partir des propositions qui leur sont données. La table de fréquence, tableau 83, décrit les stratégies mobilisées selon les tests. Les tests mobilisent entre trois et quatre stratégies, uniques ou faisant partie d'une

séquence, différentes. Il existe une pluralité de stratégies, uniques ou faisant partie d'une séquence, pour résoudre les tâches décrites dans les tests spatiaux. Certaines stratégies sont communes à plusieurs tests : la rotation mentale est mise en œuvre dans le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le CFT1, le tout réorganisé est déclaré mobilisé dans le PSVT:V1 et le R PSVT:R1 et la stratégie analytique est mise en œuvre dans le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Certaines stratégies sont spécifiques à un test e.g. une partie d'un tout est spécifique au CFT1 et la transformation mentale est mobilisée dans le MCT1.

Tableau 83. Table de fréquence des stratégies uniques relevées dans les QCM Stratégies

	Rotation mentale		Transformation mentale		Un tout réorganisé		Un tout réorganisé - Stratégie analytique		Une partie d'un tout		Autre	
Test	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
PSVT:V1	40	27			135	92	76	52			8	12
R PSVT:R1	144	99			13	9	35	25			11	8
MRT1	121	83					98	67			15	10
MCT1			139	95			81	55			20	14
CFT1	52	36							118	81	40	27

Légende. *n* = nombre d'étudiants supérieur à 0 ; % = pourcentage d'étudiants supérieur à 0

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les stratégies uniques relevées dans les QCM Stratégies selon les tests spatiaux. Les tests mobilisent entre trois et quatre stratégies uniques différentes.

Le choix de plusieurs items décrivant des stratégies de natures différentes, selon notre encodage, permet de calculer le nombre de stratégies, uniques ou faisant partie d'une séquence, que les étudiants déclarent mobiliser dans un test. Ce calcul ignore si les stratégies sont utilisées de manière isolée pour répondre à une question, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas combinées pour répondre à une question : par exemple, la rotation mentale est utilisée pour répondre à au moins une question du test. La table de fréquence 84 décrit la distribution pour le PSVT:V1 dans laquelle on peut observer que 67% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie. Les tables de fréquence des autres tests se trouvent dans le tableau A27 en annexe.

Tableau 84. Table de fréquence du nombre de stratégies uniques déclarées mobilisées dans le PSVT:V1 dans le QCM Stratégies

Nombre de stratégies	<i>n</i>	%
1	48	32,9
2	79	54,1
3	19	13
Total	146	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le PSVT:V1 dans les QCM Stratégies. 67% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie.

Nous pouvons conclure que :

- environ 67% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le PSVT:V1 ;
- environ 35% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le R PSVT:R1 ;
- environ 60% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le MRT1 ;
- environ 58% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le MCT1 ;
- environ 35,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le CFT1.

Les descriptives statistiques des cinq tests sont décrites dans le tableau 85 ci-dessous. Les étudiants mobilisent entre une et deux stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence par test en moyenne. Le R PSVT:R1 semble être le test mobilisant le plus grand nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence, mais seul un étudiant déclare mobiliser quatre stratégies différentes dans les QCM.

Tableau 85. Descriptives statistiques du nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence déclarées mobilisées dans les tests dans les QCM Stratégies

	Nombre de stratégies PSVT:V1	Nombre de stratégies R PSVT:R1	Nombre de stratégies MRT1	Nombre de stratégies MCT1	Nombre de stratégies CFT1
<i>N</i>	146	146	146	146	142
Moyenne	1,80	1,40	1,65	1,64	1,44
Médiane	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00
Écart type	0,650	0,593	0,586	0,596	0,643
Minimum	1	1	1	1	1
Maximum	3	4	3	3	3

Légende. *N* = nombre d'étudiants, Minimum = nombre de stratégies uniques le plus faible observé, Maximum = nombre de stratégies uniques le plus élevé observé, Moyenne = moyennes des stratégies uniques observé, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs.

Ce tableau regroupe les statistiques descriptives du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les tests spatiaux au premier recueil issu des QCM Stratégies. Les étudiants mobilisent entre une et deux stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence par test en moyenne.

19.12 Hypothèse HS11 : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées.

Deux types de données peuvent être mobilisés pour éprouver cette hypothèse :

- le nombre de stratégies issue des verbatim Stratégies : les 3 réponses nous renseignent sur les 3 stratégies, qu'elles soient des stratégies uniques ou des séquences de stratégies, déclarées mobilisées pour ces trois questions ;
- le nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence issu du QCM Stratégies : les réponses concernent l'ensemble des stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence mobilisés dans un test.

Le nombre de stratégies déclarées dans les verbatim à partir des trois réponses est calculé si trois réponses ont été fournies et si les trois réponses ont été encodées : si les réponses sont encodées FT (réponse générique à l'ensemble du test) ou NI (réponses non-identifiées), le calcul n'est pas réalisé et l'étudiant est écarté de l'échantillon, comme décrit dans le chapitre 14.

Le nombre de stratégies déclarées dans les QCM est calculé à partir du nombre de réponses choisies par l'étudiant et si les réponses décrivent des stratégies différentes : si deux réponses sont encodées de la même stratégie, alors ces deux réponses comptent pour une, comme décrit dans le chapitre 14.

Nous allons tester notre hypothèse avec la variable nombre de stratégies extraite des verbatim, puis avec la variable extraite des QCM.

19.12.1 Hypothèse HS11a : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées issu des verbatim Stratégies

Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1 et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, dont les résultats sont décrits dans le tableau 86.

Tableau 86. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et le nombre de stratégies déclarées dans les verbatim

Test	<i>N</i>	$\chi^2(2)$	<i>p</i>
PSVT:V1	141	2,33	0,312
R PSVT:R1	142	1,94	0,379
MRT1	138	4,65	0,098
MCT1	125	4,82	0,090

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*. Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de stratégies déclarées dans les verbatim et la significativité du résultat.

Les résultats des tests ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1.

Le résultat de l'ANOVA pour le CFT1 est négatif : CFT1 : $F(2,133) = 1,99$; $p = 0,141$.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants de notre échantillon liée au nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim pour les tests spatiaux.

19.12.2 Hypothèse HS11b : La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées issu des QCM Stratégies

Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1 et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, dont les résultats sont regroupés dans le tableau 87.

Tableau 87. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et le nombre de Stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies

Test	<i>N</i>	χ^2	<i>dl</i>	<i>p</i>
PSVT:V1	144	0,39	2	0,824
R PSVT:R1	146	4,47	3	0,218
MRT1	142	2,75	2	0,253
MCT1	146	9,15	2	0,010

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de stratégies déclarées dans les QCM et la significativité du résultat.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat sont très significatif pour le MCT1. Il existe une différence de performance entre les étudiants de notre échantillon liée au nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence déclarées mobilisées dans les QCM pour le MCT1. Les boîtes à moustaches, illustrées figure A28 en annexe, montrent un résultat en faveur des étudiants déclarant mobiliser deux stratégies sur les étudiants déclarant en mobiliser une ou trois.

L'ANOVA indique un résultat très significatif pour le nombre de stratégies et la performance au CFT1 : $F(2,143) = 6,81$; $p = 0,001$. Il existe une différence de performance liée au nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence déclarées mobilisées dans les QCM entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1. Les boîtes à moustaches, illustrées figure A29 en annexe, montrent une performance supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser deux et trois stratégies.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et le MRT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants de notre échantillon liée au nombre de stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence déclarées mobilisées dans les QCM pour ces tests.

Nous nous posons aussi la question de savoir s'il existe une différence entre les étudiants de notre échantillon ayant déclaré une stratégie et les étudiants ayant déclaré plus d'une stratégie unique ou faisant partie d'une séquence. Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour le test de Student pour échantillons indépendants pour le CFT1, et le test *U* de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, dont les résultats sont décrits dans le tableau 88.

Tableau 88. Résultats du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et la mobilisation d'une ou plusieurs stratégies d'après les QCM Stratégies

Test	N	U	p
PSVT:V1	144	2346	0,858
R PSVT:R1	146	1972,50	0,063
MRT1	142	2805,50	0,124
MCT1	146	3352	0,003

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p
Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la mobilisation d'une ou plusieurs stratégies d'après les QCM et la significativité du résultat.

Le test U de Mann-Whitney indique un résultat un résultat très significatif pour le MCT1. Il existe une différence pour le MCT1. Les boîtes à moustaches, illustrées figure A30 en annexe, indique un résultat en faveur des étudiants déclarant mobiliser plus d'une stratégie, unique ou faisant partie d'une séquence.

Le test U de Mann-Whitney indique un résultat un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et le MRT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants entre les étudiants de notre échantillon ayant déclaré une stratégie et les étudiants avec plus d'une stratégie de notre échantillon pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et le MRT1.

Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat très significatif : $F(1,144) = 12,81$; $p < 0,001$. Il existe une différence de performance entre les étudiants entre les étudiants de notre échantillon ayant déclaré une stratégie, unique ou faisant partie d'une séquence, et les étudiants avec plus d'une stratégie, unique ou faisant partie d'une séquence, de notre échantillon pour le CFT1. Les boîtes à moustaches, illustrées figure A31 en annexe, indique un résultat en faveur des étudiants déclarer plus d'une stratégie, unique ou faisant partie d'une séquence.

19.13 Hypothèse HS12 : La performance aux tests spatiaux est liée aux combinaisons de stratégies mobilisées : certaines combinaisons sont plus efficaces que d'autres.

Les stratégies déclarées dans les QCM sont applicables à l'ensemble des questions d'un test. Lorsque les étudiants ont coché plusieurs réponses, des combinaisons de stratégies mobilisées dans l'ensemble d'un test sont identifiables en concaténant les réponses. Ceci produit des catégories dont la distribution est décrite dans le tableau 18 pour le PSVT:V1, le tableau A1 en annexe pour le R PSVT:R1, le tableau A2 en annexe pour le MRT1, le tableau A3 en annexe pour le MCT1 et le tableau A4 en annexe pour le CFT1. Nous utilisons ces catégories, qui reprennent à la fois les combinaisons à stratégie unique et à stratégies multiples, pour tester la relation entre performance aux tests spatiaux et efficacité des stratégies adoptées pour résoudre les tâches présentées dans ces tests.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1 et le test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, dont les résultats sont décrits dans le tableau 89.

Tableau 89. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et les combinaisons de stratégies déclarées dans les QCM

Test	<i>N</i>	χ^2	<i>dl</i>	<i>p</i>
PSVT:V1	144	3,89	10	0,952
R PSVT:R1	146	6,98	7	0,431
MRT1	146	6,30	7	0,506
MCT1	146	14,44	6	0,025

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les combinaisons de stratégies déclarées dans les QCM et la significativité du résultat.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis est significatif pour le MCT1. Il existe une différence de performance entre les étudiants de notre échantillon lié aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM pour le MCT1. La consultation du tableau de comparaisons appariées produit par SPSS, décrites dans le tableau A20 en annexe, indique que la significativité du résultat concerne la comparaison entre les catégories QCMU (transformation mentale et prise en compte des mesures) et QCMV (transformation mentale). Les boîtes à moustaches, illustrées figure A33 en annexe, montrent un résultat significatif en faveur des étudiants déclarant mobiliser la combinaison QCMU (transformation mentale et prise en compte des mesures) sur les étudiants déclarant mobiliser la stratégie QCMV (transformation mentale).

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et le MRT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants de notre échantillon liée aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1 et le MRT1.

L'ANOVA indique un résultat très significatif pour la catégorie de loisirs artistiques et la performance au CFT1 : $F(6,139) = 4,49$; $p < 0,001$. Il existe une différence de performance liée au nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM entre les étudiants de notre échantillon pour le CFT1. Les boîtes à moustaches, illustrées figure A34 annexe, montrent un résultat en faveur des étudiants déclarant mobiliser la combinaison QCMD (Autre stratégie-Rotation mentale – Une partie d'un tout), c'est-à-dire les étudiants qui ont déclaré avoir déplacé la forme, cherché le stimulus dans les motifs proposés et utilisé une autre stratégie.

19.14 Hypothèse HS13 : Les étudiants changent de stratégie au sein d'un test.

Les études de Kyllonen (Kyllonen *et al.*, 1981; Lohman et Kyllonen, 1983), Eme et Marquer (1998) et Pilardeau (2008) ont montré que les sujets changeaient de stratégie dans un test spatial. Nous souhaitons vérifier s'il en est de même pour notre échantillon.

Le questionnaire ouvert Stratégies a produit des verbatim pour trois questions issues de chaque test. Si une des réponses sur les trois fournies pour un test est différente d'au moins une des autres, alors il y a changement de stratégies. Si les réponses sont encodées FT (réponse générique à l'ensemble du test), le changement de stratégie ne peut être identifié et l'étudiant est écarté de l'échantillon. Si une des réponses ne peut être identifiée (NI) mais que deux réponses sur les trois sont encodées, alors on peut identifier un changement. Si au moins deux réponses ont été encodées NI, le changement ne peut être identifié et l'étudiant est écarté. La

table de fréquence 90 décrit la distribution pour le PSVT:V1 dans laquelle on peut observer que 52% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie. La table de fréquence des autres tests, tableau A21, se trouvent en annexe.

Tableau 90. Table de fréquence du changement de stratégie pour le PSVT:V1 d'après les verbatim Stratégies

Changement de stratégie	<i>n</i>	%
Non	69	47,6
Oui	76	52,4
Total	145	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants selon qu'ils changent de stratégie ou pas dans le PSVT:V1 d'après les verbatim Stratégies. 53% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie.

Nous pouvons conclure que :

- 52,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le PSVT:V1 ;
- 32,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le R PSVT:R1 ;
- 32,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le MRT1 ;
- 63% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le MCT1 ;
- 36,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies pour le CFT1.

19.15 Hypothèse HS14 : Les étudiants déclarant changer de stratégies au sein d'un même test performant mieux que les étudiants qui utilisent toujours la même stratégie.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous optons pour le test de Student pour échantillons indépendants pour le CFT1 et le test *U* de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, dont les résultats sont décrits dans le tableau 91.

Tableau 91. Résultats du test *U* de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 mettant en regard la performance spatiale et le changement de stratégie d'après les verbatim

Test	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>p</i>
PSVT:V1	143	2803,5	0,308
R PSVT:R1	144	2323	0,852
MRT1	139	2549,5	0,050
MCT1	136	2636,5	0,028

Légende. *N* = nombre d'étudiants, *U* = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour la performance au PSVT:V1, au R PSVT:R1, au MRT1 et au MCT1 et le changement de stratégie d'après les verbatim et la significativité du résultat.

Les résultats du test *U* de Mann-Whitney un résultat faiblement significatif pour le MRT1 et significatif pour le MCT1. Il existe une différence de performance pour le MRT1 et le MCT1 entre les étudiants entre les étudiants de notre échantillon ayant déclaré une stratégie et les étudiants changeant de stratégie de notre échantillon. Les boîtes à moustaches, illustrées dans

les figures A35 et A36 en annexe, indique un résultat en faveur des étudiants déclarant changer de stratégie.

Le test U de Mann-Whitney indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1 et le R PSVT:R1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants changeant de stratégie et les autres pour le PSVT:V1 et le R PSVT:R1.

Le test de Student pour le CFT1 et le changement de stratégie indique un résultat faiblement significatif $t(138) = -1,498$; $p = 0,053$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A37 annexe, indique une différence de performance en faveur des étudiants changeant de stratégies.

19.16 Récapitulatif des résultats de ce chapitre

Code	Hypothèse	Résultat
HS1	La performance aux tests spatiaux est liée au genre.	<ul style="list-style-type: none"> • Les hommes performant mieux au PSVT:V1. • Les femmes performant mieux au CFT1. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée au genre au R PSVT:R1, au MRT1 et au MCT1.
HS2	Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux aux tests spatiaux que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux entre les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques et les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques.
HS3	La performance aux tests spatiaux est liée à la prévalence manuelle.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux liée à la prévalence manuelle.
HS4	La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants ayant appris une seule langue maternelle performant mieux au R PSVT:R1. • Il existe une différence de performance au PSVT:V1 et au MCT1 faiblement significative favorable aux étudiants n'ayant appris qu'une seule langue maternelle. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée au nombre de langues maternelles au CFT1 et au MRT1.

HS5	La performance aux tests spatiaux est liée à la pratique de logiciels de modélisation.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants ayant déjà pratiqué des logiciels de modélisation performant mieux au R PSVT:R1 et au MCT1. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée à la pratique de logiciel de modélisation au PSVT:V1, au MRT1 et au CFT1.
HS6	La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de logiciels de modélisation pratiqués.	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une différence de performance faiblement significative au R PSVT:R1 et significative au MCT1 liée au nombre de logiciels de modélisation pratiqués : la performance augmente avec le nombre de logiciels pratiqués. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance selon le nombre de logiciels pratiqués au PSVT:V1, au MRT1 et au CFT1.
HS7	La performance spatiale est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence.	<ul style="list-style-type: none"> • La performance au PSVT:V1 est liée à la pratique de loisirs manipulatoires durant l'enfance et l'adolescence. • La performance au R PSVT:R1 et au MRT1 est liée à la pratique de loisirs dynamiques et manipulatoires durant l'enfance et l'adolescence. • La performance au MCT1 est liée à la pratique de loisirs dynamiques, manipulatoires et de construction 3D durant l'enfance et l'adolescence. • La performance au CFT1 est liée à la pratique de loisirs 2D et de construction 3D durant l'enfance et l'adolescence. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance selon la pratique de loisirs artistiques durant l'enfance et l'adolescence aux tests spatiaux. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance selon la pratique de loisirs 2D durant l'enfance et l'adolescence au PSVT:V1, R PSVT:R1, au MRT1 et au MCT1. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de

		<p>performance au CFT1 selon la pratique de loisirs dynamiques et manipulatoires durant l'enfance et l'adolescence.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1 selon la pratique de loisirs dynamiques durant l'enfance et l'adolescence. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1, au R PSVT:R1 et au MRT1 selon la pratique de loisirs de construction 3D durant l'enfance et l'adolescence.
HS8	La performance spatiale est liée à la pratique régulière de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données.	<ul style="list-style-type: none"> • La performance au R PSVT:R1 est liée à la pratique de loisirs dynamiques et manipulatoires à l'âge adulte. • La performance au MCT1 et au CFT1 est liée à la pratique de loisirs dynamiques à l'âge adulte. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux selon la pratique de loisirs artistiques à l'âge adulte. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux selon la pratique de loisirs 2D à l'âge adulte. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1 et au MRT1 selon la pratique de loisirs dynamiques à l'âge adulte. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1, au MRT1, au MCT1 et au CFT1 selon la pratique de loisirs manipulatoires à l'âge adulte. • La performance au PSVT:V1 et au CFT1 est liée à la pratique de loisirs de construction à l'âge adulte. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux autres tests spatiaux selon la pratique

		de loisirs de construction 3D à l'âge adulte.
HS9	La performance spatiale est liée au niveau d'anglais.	La performance aux tests spatiaux n'est pas liée à la performance au test de positionnement anglais.
HS10	Les étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies dans un test.	Certains étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies dans le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1, le MCT1 et le CFT1. Ces stratégies peuvent être uniques, faire partie d'une séquence mobilisée pour une réponse, ou d'une combinaison utilisée pour l'ensemble des réponses d'un test.
HS11	La performance aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies mobilisées.	<ul style="list-style-type: none"> • La performance au MCT1 et au CFT1 est liée au recours à plus d'une stratégie unique ou prise dans une séquence, d'après les QCM Stratégies. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1, au R PSVT:R1 et au MRT1 selon le nombre de stratégies mobilisées, qu'elles soient uniques ou prises dans une combinaison propre à l'ensemble d'un test ou prises dans une séquence propre à une question.
HS12	La performance aux tests spatiaux est liée aux combinaisons de stratégies mobilisées : certaines combinaisons sont plus efficaces que d'autres.	<ul style="list-style-type: none"> • Certaines combinaisons de stratégies sont plus efficaces pour le MCT1 et le CFT1. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1, au R PSVT:R1 et au MRT1 selon la combinaison de stratégie mobilisée.
HS13	Les étudiants changent de stratégie au sein d'un test.	Certains étudiants déclarent changer de stratégie dans le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1, le MCT1 et le CFT1.
HS14	Les étudiants déclarant changer de stratégies au sein d'un même test performant mieux que les étudiants qui utilisent toujours la même stratégie.	<ul style="list-style-type: none"> • La performance au MCT1 est liée au fait de changer de stratégie dans le test. • Il existe une différence de performance au MRT1 et au CFT1 faiblement significative en faveur des étudiants ayant au recours à un changement de stratégie. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au PSVT:V1 et au R

		PSVT:R1 selon que les étudiants changent de stratégie.
--	--	--

19.17 Synthèse des résultats de ce chapitre

Nous extrayons les résultats significatifs et faiblement significatifs et les regroupons autour des deux facteurs spatiaux du cadre de Tarte (1984), soit la visualisation spatiale et l'orientation spatiale, afin d'identifier si ces résultats sont plutôt liés à un de ces facteurs. Le tableau 92 indique pour chaque résultat significatif et faiblement significatif le nombre de test relatifs à ces deux facteurs, et lorsque le nombre est inférieur au total des tests spatiaux concernés (i.e. trois pour la visualisation spatiale et deux pour l'orientation spatiale, le sous-facteur concerné i.e. rotation mentale ou transformation mentale pour la visualisation spatiale et un tout réorganisé et une partie d'un tout pour l'orientation spatiale. Par exemple, la pratique antérieure de logiciels de modélisation est liée significativement à deux tests de visualisation spatiale.

Tableau 92. Récapitulatif des résultats significatifs et faiblement significatifs des hypothèses HS

Variable		Visualisation spatiale		Orientation spatiale	
		Facteur	<i>n</i>	Facteur	<i>n</i>
Logiciels de modélisation	Pratique antérieure	VS	2/3		0
	Nombre de logiciels pratiqués	VS (RM faible)	2/3		0
Loisirs : enfance et adolescence	dynamiques	VS	3/3		0
	manipulatoires	VS	3/3	TR	1/2
	de construction	TM	1/3	UT	1/2
	2D		0	UT	1/2
	artistiques		0		0
Loisirs : âge adulte	dynamiques	RM	1/3	UT	1/2
	manipulatoires	RM	1/3		0
	de construction		0	OS	2/2
	2D		0		0
	artistiques		0		0
Stratégies	Changement de séquence	VS (RM faible)	2/3	UT (faible)	1/2
	>1 stratégie unique ou combinée	TM	1/3	UT	1/2
	Nombre de stratégies uniques ou combinées	TM	1/3	UT	1/2
	Efficacité des combinaisons	TM	1/3	UT	1/2
Genre	En faveur des hommes		0	TR	1/2
	En faveur des femmes		0	UT	1/2
Nombre de langues maternelles		VS (TM faible)	2/3	TR (faible)	1/2

Légende. *n* = nombre de tests ; >1 = plus d'une stratégie déclarée mobilisée.

VS = visualisation spatiale ; RM= rotation mentale ; TM = transformation mentale.

OS = orientation spatiale ; TR = un tout réorganisé ; UT = une partie d'un tout.

Nous pouvons voir à partir des résultats significatifs et faiblement significatifs regroupés dans le tableau 92 que :

- Les étudiants ayant pratiqué des logiciels de modélisation, qui permettent de manipuler des objets virtuels, performant mieux à deux tests de visualisation spatiale, définie par la capacité à manipuler mentalement des objets. Ces deux activités nécessitent une manipulation virtuelle qui pourrait expliquer ce résultat. En revanche, le contenu technologique de la formation reçue par les étudiants n'a pas d'effet sur leur

performance en habileté spatiale. Il se peut que la pratique de logiciels de modélisation ne soit pas limitée aux formations contenant des enseignements technologiques.

- Les étudiants ayant pratiqué des loisirs dynamiques et manipulatoires, qui impliquent la manipulation du corps et la manipulation d'artefacts, dans l'enfance performant mieux aux trois tests de visualisation spatiale, définie par la capacité à manipuler mentalement des objets. Ces deux activités ont en commun une manipulation, virtuelle ou réelle, qui pourrait expliquer ce résultat.
- Les étudiants ayant pratiqué des loisirs de construction 3D, qui impliquent la manipulation d'artefacts et pour certains d'entre eux la lecture de plans, e.g. Lego, dans l'enfance performant mieux au test de transformation spatiale, définie par la capacité à manipuler mentalement une partie d'un objet, et au test d'extraction d'un élément simple intriqué dans un motif complexe. La pratique de loisirs de construction, dont certains requièrent de constituer des objets à partir d'éléments simples à partir de représentations 2D, pourrait expliquer une plus grande capacité à manipuler virtuellement des objets et à isoler des éléments intégrés dans un environnement.
- Les femmes performant mieux que les hommes au test de dissociation. Nous remarquons d'autre part que la pratique de loisirs 2D dans l'enfance est liée à une meilleure performance à ce test. Ce résultat invite à explorer le lien entre genre et pratique de loisirs pour identifier un lien entre performance aux tests et loisirs qui pourrait expliquer cette différence pour le genre.
- Nous obtenons des résultats significatifs pour le lien entre loisirs dynamiques, manipulatoires et de construction 3D pratiqués à l'âge adulte mais les effectifs et les distributions de ces catégories ne nous permettent pas d'en tirer des interprétations.
- La performance aux tests spatiaux est davantage liée aux pratiques de loisirs dans l'enfance et l'adolescence et plutôt qu'à l'âge adulte. Ce résultat suggère que les jeunes adultes ne pratiquent plus ou moins de loisirs manipulatoires, de construction 3D et artistiques que les enfants et adolescents. Cette suggestion pourrait être investiguée en vérifiant la différence de pratique de loisirs des étudiants selon les deux temporalités. Une autre explication possible est que l'enfance et l'adolescence seraient des périodes plus propices pour acquérir des compétences utiles à la résolution de problèmes spatiaux. Il est possible aussi que notre questionnaire n'ait pas repris les loisirs, pratiqués par les jeunes adultes, en lien avec l'habileté spatiale, ou encore que les loisirs pratiqués par les jeunes adultes ne soient pas favorables au développement spatial.
- La prévalence manuelle et le niveau d'anglais n'ont pas d'effet sur la performance aux tests spatiaux.
- Dans tous les tests spatiaux, on remarque que certains étudiants mobilisent plusieurs stratégies. De même, dans tous les tests spatiaux, certains étudiants changent de stratégie. Ce changement de stratégie est bénéfique à la performance de deux tests de visualisation spatiale et au test de dissociation. Ceci pourrait signifier que certaines stratégies sont plus efficaces pour certaines questions.
- Les résultats concernant le nombre de stratégies peuvent sembler contradictoires : ils ne sont significatifs pour aucun des tests quand les données sont extraites de l'encodage des verbatim et significatifs pour le MCT1 et le CFT1 pour les données extraites de l'encodage des QCM. Comme expliqué précédemment, les verbatim ont permis d'identifier des stratégies qui sont des séquences de stratégies uniques ou multiples spécifiques à certaines questions. Les QCM quant à eux ont permis d'identifier des stratégies, à partir d'une liste limitée, mobilisées seules ou combinées dans l'ensemble d'un test. Le nombre de stratégies, au sens de séquence composée d'une série de stratégies brique, est spécifique à trois questions et notre étude s'est limitée à trois questions. Étendre l'étude à l'ensemble des questions permettrait d'affiner ce résultat.

Le résultat issu du traitement des QCM confirme que certains étudiants utilisent plusieurs stratégies, seules ou combinées, dans un test et que cette versatilité participe à la performance.

Chapitre 20. Lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles

Dans ce chapitre, nous allons éprouver les hypothèses MV1-MV25 explorant la relation entre performance à l'exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles. Les hypothèses MV1-MV22 concernent les variables extrinsèques à notre mesure de la capacité à modéliser en trois dimensions :

- genre ;
- formation ;
- prévalence manuelle ;
- nombre de langues maternelles ;
- pratique de logiciels de modélisation ;
- nombre de logiciels de modélisation pratiqués ;
- pratique régulière de loisirs dans l'enfance et l'adolescence ;
- pratique régulière de loisirs à l'âge adulte ;
- performance en anglais ;
- scores aux tests spatiaux.

Les hypothèses MV23-MV25 concernent les variables intrinsèques à notre mesure :

- stratégie de perçage de la clavette ;
- stratégie de longueur totale de la pièce ;
- stratégie longueur totale-symétrie.

Nous vérifierons d'abord la normalité de la distribution des scores des modélisations afin d'orienter le choix des tests statistiques pertinents pour éprouver nos hypothèses.

La synthèse des résultats de ces traitements statistiques se trouve paragraphe 20.26, p. 247.

20.1 Vérification de la normalité

20.1.1 Scores de modélisation

Nous allons dans un premier temps décrire la distribution des tests et vérifier la normalité de la distribution des scores à l'aide du test de Shapiro-Wilk appliqué à la moyenne.

129 étudiants ont participé à l'expérimentation sur la modélisation. Les scores s'étalent de 12 à 35, la médiane est de 33 et l'écart-type 4,46. Ces résultats sont présentés dans le tableau 93.

Tableau 93. Statistiques descriptives des scores de modélisation

<i>N</i>	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type
129	12	35	31,05	33	4,455

Légende. *N* = nombre d'étudiants, Minimum = score le plus faible observé, Maximum = score le plus élevé observé, Moyenne = moyennes des scores observé, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs. Ce tableau présente la tendance centrale et l'étendu des scores de modélisation.

Le test de Shapiro-Wilk appliqué à la moyenne des scores présente un résultat très significatif $W = 0,76$; $p < 0,001$ présenté dans le tableau 94. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse selon laquelle la distribution des scores obtenus, illustrée dans la figure 62, suit la loi normale.

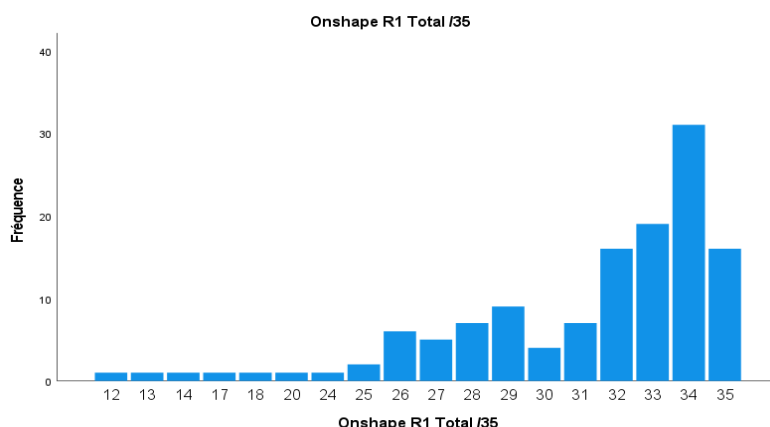
Tableau 94. Résultats du test de normalité des scores de modélisation au premier recueil

	Shapiro-Wilk		
	W	dl	p
Onshape 1	0,758	129	0,000

Légende. W = statistique du test de Shapiro-Wilk, dl = degré de liberté, p = valeur de p , Onshape R1 = scores de modélisation au recueil 1.

Ce tableau indique le résultat du test, le degré de liberté et la significativité du résultat pour les scores de modélisation au premier recueil.

Figure 62. Distribution des scores de modélisation au recueil 1 ($N = 129$)



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.

On observe un étalement important des scores faibles et moyens alors que la distribution des scores entre 30 et 35 semble normale.

Compte tenu des résultats du test de Shapiro-Wilk pour les scores de modélisation, nous allons utiliser les tests non-paramétriques pour les hypothèses relatives aux scores de modélisation :

- test de Mann-Whitney pour comparer les scores à des variables déclinées en deux catégories, e.g. le genre ;
- test de Krsukal-wallis pour comparer les scores à des variables déclinées en plus de deux catégories, e.g. les loisirs ;
- corrélation de Spearman pour comparer des scores entre eux, e.g. scores de modélisation et scores spatiaux.

20.1.2 Scores d'habileté spatiale

De même, nous vérifions la normalité de la distribution des scores spatiaux pour l'échantillon des 129 étudiants ayant participé à l'expérimentation sur la modélisation volumique à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les résultats sont présentés dans le tableau 95.

Tableau 95. Résultats du test de normalité des scores spatiaux ($N = 129$)

Test spatial	Shapiro-Wilk		
	W	dl	p
PSVT:V1	0,761	127	0,000
R PSVT:R1	0,896	129	0,000
MRT1	0,956	129	0,000
MCT1	0,967	129	0,003
CFT1	0,996	129	0,967

Légende. W = statistique du test de Shapiro-Wilk, dl = degré de liberté, p = valeur de p .

Ce tableau indique le résultat du test, le degré de liberté et la significativité du résultat pour les scores des tests spatiaux.

Seule la distribution des scores du CFT suit la loi normale.

Compte tenu des résultats du test de Shapiro-Wilk pour les scores de modélisation, nous allons utiliser les tests non-paramétriques pour les hypothèses relatives aux scores au PSVT:V1, au R PSVT:R1, au MRT1 et au MCT1:

- test de Mann-Whitney pour comparer les scores à des variables déclinées en deux catégories e.g. le perçage de la clavette ;
- test de Kruskal-wallis pour comparer les scores à des variables déclinées en plus de deux catégories e.g. le nombre de volumes fonctionnels.

Nous utiliserons les tests paramétriques pour le CFT1 :

- test de Student pour comparer les scores à des variables déclinées en deux catégories e.g. le perçage de la clavette ;
- ANOVA à un facteur pour comparer les scores à des variables déclinées en plus de deux catégories e.g. le nombre de volumes fonctionnels.

Nous vérifions qu'il n'y pas de valeur éloignée à écarter pour la distribution du CFT1 (Kinnear et Gray, 2015, p. 168).

20.2 Hypothèse MV1 : La performance en modélisation volumique est liée au genre.

L'échantillon est composé de 129 étudiants, $N_F = 26$ [20,2%] femmes et $N_H = 103$ [79,8%] hommes.

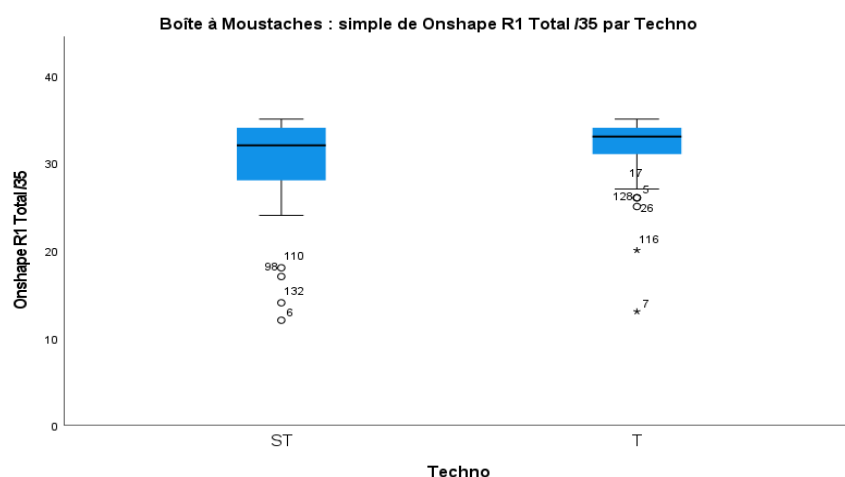
Le résultat du test U de Mann-Whitney n'est pas significatif : $U = 1538,0$; $p = 0,238$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les hommes et les femmes de notre échantillon pour l'exercice de modélisation.

20.3 Hypothèse MV2 : La performance en modélisation volumique est liée à la formation.

L'échantillon est composé de $N_T = 73$ [56,6%] étudiants issus de formations comprenant des enseignements technologiques et $N_{ST} = 56$ [43,4%] étudiants issus de formations sans enseignements technologiques.

Le résultat du test U de Mann-Whitney est significatif : $U = 2484,0$; $p = 0,035$. Il existe une différence de performance entre les étudiants issus de formations technologiques et les autres étudiants de notre échantillon pour l'exercice de modélisation. Les boîtes à moustaches, présentées dans la figure 63, illustrant leur distribution indique une performance en faveur des étudiants issus de formations technologiques.

Figure 63. Distribution des scores de modélisation selon la formation



Légende. ST = formations sans enseignements technologiques, T = formations avec enseignements technologiques, Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants issus de formations avec ou sans enseignements technologiques.

Les étudiants issus de formations technologiques performent mieux que ceux sans bagage technologique. Leurs scores sont aussi plus resserrés.

20.4 Hypothèse MV3 : La performance en modélisation volumique est liée à la prévalence manuelle.

L'échantillon est composé de $N_D = 107$ [82,9%] droitiers, $N_G = 17$ [13,2%] gauchers et $N_A = 5$ [3,9%] ambidextres.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis n'est pas significatif $\chi^2(2) = 4,40$; $p = 0,111$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les gauchers, les droitiers et les ambidextres de notre échantillon pour l'exercice de modélisation.

20.5 Hypothèse MV4 : La performance en modélisation volumique est liée au nombre de langues maternelles

L'échantillon est composé de $N_{1LM} = 106$ [82,2%] étudiants ayant appris une langue maternelle, $N_{2LM} = 18$ [14,0%] étudiants ayant appris deux langues maternelles et $N_M = 5$ [3,9%] étudiants pour lesquels l'information est manquante.

Le résultat du test U de Mann-Whitney n'est pas significatif $U = 698,5$; $p = 0,067$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre les étudiants de notre échantillon ayant appris deux langues maternelles et ceux en ayant appris une.

20.6 Hypothèse MV5 : La performance en modélisation volumique est liée à la pratique antérieure de logiciels de modélisation

L'échantillon est composé de $N_{SL} = 16$ [12,4%] étudiants n'ayant pas pratiqué de logiciels de modélisation et $N_L = 113$ [87,6%] étudiants ayant pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Le résultat du test U de Mann-Whitney est très significatif : $U = 1264,5$; $p = 0,007$. Il existe une différence de performance entre les catégories d'étudiants de notre échantillon selon leur pratique antérieure des logiciels de modélisation pour l'exercice de modélisation. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A38 en annexe, indique une performance inférieure des étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation par rapport à ceux en ont pratiqué au moins un.

20.7 Hypothèse MV6 : La performance en modélisation volumique est liée au nombre de logiciels pratiqués.

L'échantillon est composé de $N_{0L} = 16$ [12,4%] étudiants n'ayant pratiqué de logiciel de modélisation, $N_{1L} = 52$ [40,3%] étudiants ayant pratiqué un logiciel de modélisation, $N_{2L} = 50$ [38,8%] étudiants ayant pratiqué deux logiciels de modélisation, $N_{3L} = 10$ [7,8%] étudiants ayant pratiqué trois logiciels de modélisation et $N_{4L} = 1$ [0,8%] étudiant ayant pratiqué quatre logiciels de modélisation.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis est significatif : $\chi^2(3) = 9,11$; $p = 0,028$. Il existe une différence de performance entre les catégories d'étudiants de notre échantillon selon leur le nombre de logiciels de modélisation pratiqués pour l'exercice de modélisation. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A39 en annexe, semble indiquer une performance en modélisation croissante des catégories d'étudiants selon le nombre de logiciels pratiqués.

20.8 Hypothèse MV7 : La performance en modélisation volumique est liée à la pratique de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence

Les réponses au questionnaire Loisirs pratiqués durant l'enfance et l'adolescence ont été encodées pour produire des catégories d'étudiants regroupés selon la nature de leurs loisirs, le nombre de loisirs de même nature pratiqués et la fréquence à laquelle ces loisirs ont été pratiqués (cette méthodologie est décrite dans le chapitre 15). Ces douze catégories ont été regroupées selon la dimension dynamique (notée DEP), manipulatoire (notée M), 2D (notée 2D), construction 3D (notée C3D), et artistique (notée ART) qui les caractérisent selon notre encodage. Pour chaque dimension, le nombre de ces catégories est supérieur à deux. Nous optons pour le test de Kruskal-Wallis.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivis des résultats des loisirs manipulatoires, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

20.8.1 Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les vingt-sept catégories dynamiques (DEP) possibles, seize sont mobilisées. Leur distribution est présentée dans le tableau A22, en annexe.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs dynamiques pratiqués fréquemment dans l'enfance et l'adolescence n'est pas significatif : $\chi^2(15) = 22,27$; $p = 0,101$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.8.2 Loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les vingt-sept catégories manipulatoires (M) possibles, dix-neuf sont mobilisées. La distribution des catégories manipulatoires est présentée dans le tableau A23, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs manipulatoires pratiqués fréquemment dans l'enfance et l'adolescence : $\chi^2(18) = 22,22$; $p = 0,148$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.8.3 Loisirs en 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories 2D possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories 2D est présentée le tableau A24, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs 2D pratiqués fréquemment dans l'enfance et l'adolescence : $\chi^2(6) = 4,63$; $p = 0,592$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.8.4 Loisirs avec construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories construction 3D (C3D) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories C3D est présentée le tableau A25, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs de construction 3D pratiqués fréquemment dans l'enfance et l'adolescence : $\chi^2(6) = 6,34$; $p = 0,386$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs de construction 3D dans l'enfance et l'adolescence entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.8.5 Loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Parmi les neuf catégories artistiques (ART) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories ART est présentée le tableau A26, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs artistiques pratiqués fréquemment dans l'enfance et l'adolescence : $\chi^2(6) = 6,08$; $p = 0,415$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs artistiques dans l'enfance et l'adolescence entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.9 Hypothèse MV8 : La performance en modélisation volumique est liée à la pratique de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données.

Nous investiguons la relation entre modélisation volumique et pratique contemporaine des loisirs pour voir si la performance à l'exercice de modélisation peut être liée aux loisirs pratiqués à l'âge adulte. Le nombre de catégories de loisirs étant supérieure à deux, nous optons à nouveau pour le test de Kruskal-Wallis.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivis des résultats des loisirs manipulateurs, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

20.9.1 Loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués à l'âge adulte

Parmi les vingt-sept catégories dynamiques (DEP) possibles, treize sont mobilisées. La distribution des catégories DEP est présentée dans le tableau A27, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs dynamiques pratiqués fréquemment à l'âge adulte : $\chi^2(12) = 13,85$; $p = 0,311$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs dynamiques à l'âge adulte entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.9.2 Loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte

Parmi les vingt-sept catégories manipulateurs (M) possibles, seize sont mobilisées. La distribution des catégories M est présentée le tableau A28, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs manipulateurs pratiqués fréquemment à l'âge adulte : $\chi^2(15) = 24,01$; $p = 0,064$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs manipulateurs à l'âge adulte entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.9.3 Loisirs en 2D pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories 2D (2D) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories 2D est présentée le tableau A29, en annexe.

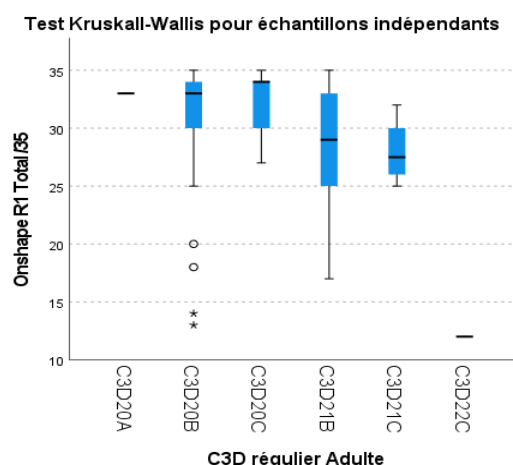
Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs dynamiques pratiqués fréquemment à l'âge adulte : $\chi^2(6) = 8,85$; $p = 0,182$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs 2D à l'âge adulte entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.9.4 Loisirs avec construction 3D pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories construction 3D (C3D) possibles, six sont mobilisées. La distribution des catégories C3D est présentée le tableau A30, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs de construction pratiqués fréquemment à l'âge adulte : $\chi^2(5) = 11,10$; $p = 0,049$. Il existe une différence de performance liée aux pratiques de loisirs avec construction 3D à l'âge adulte entre les étudiants de notre échantillon. L'observation des boîtes à moustaches, présentées dans la figure 64, révèle une performance en modélisation plus élevée pour les étudiants ne pratiquant pas de loisirs de construction, i.e. C3D20B, C3D20C, que ceux qui en pratiquent de manière modérée, C3D21B, C3D21C.

Figure 64. Distribution des scores de modélisation selon les loisirs de construction pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau A16, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants selon leur pratique de loisirs de construction à l'âge adulte.

Les performances les plus élevées concernent les catégories à fréquence de loisirs C3D nulle.

La consultation du tableau de comparaisons appariées produit par SPSS indique que la significativité du résultat concerne la comparaison entre les catégories C3D21C et C3D21B et les catégories C3D21C et C3D20A.

Tableau 96. Comparaisons appariées de C3D – Âge adulte ($N = 129$)

Échantillon 1- Échantillon 2	Statistiques de test	Erreur standard	Statistiques de test standard	p	Sig. Sig. ^a
C3D22C-C3D21C	25,500	41,340	0,617	0,537	1,000
C3D22C-C3D21B	43,125	39,219	1,100	0,272	1,000
C3D22C-C3D20B	66,637	37,156	1,793	0,073	1,000
C3D22C-C3D20A	72,000	52,291	1,377	0,169	1,000
C3D22C-C3D20C	72,308	38,371	1,884	0,060	0,893
C3D21C-C3D21B	17,625	22,643	0,778	0,436	1,000
C3D21C-C3D20B	41,137	18,847	2,183	0,029	0,436
C3D21C-C3D20A	46,500	41,340	1,125	0,261	1,000
C3D21C-C3D20C	46,808	21,142	2,214	0,027	0,402
C3D21B-C3D20B	23,512	13,576	1,732	0,083	1,000
C3D21B-C3D20A	28,875	39,219	0,736	0,462	1,000
C3D21B-C3D20C	29,183	16,615	1,756	0,079	1,000
C3D20B-C3D20A	5,363	37,156	0,144	0,885	1,000
C3D20B-C3D20C	-5,670	10,889	-0,521	0,603	1,000
C3D20A-C3D20C	-0,308	38,371	-0,008	0,994	1,000

Légende. p = valeur de p .

Note. Tableau produit par SPSS.

Chaque ligne teste l'hypothèse nulle selon laquelle les distributions Échantillon 1 et Échantillon 2 sont égales. Les significations asymptotiques (tests bilatéraux) sont affichées. Le niveau de signification est de ,050.

a. Les valeurs de signification ont été ajustées par la correction Bonferroni pour plusieurs tests.

Étant donné le faible effectif de la catégorie C3D21C ($n = 4$), nous considérons qu'il n'est pas représentatif de notre échantillon et décidons de ne pas retenir ce résultat.

20.9.5 Loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte

Parmi les neuf catégories artistiques (ART) possibles, sept sont mobilisées. La distribution des catégories C3D est présentée le tableau A31, en annexe.

Le test de Kruskal-Wallis un résultat non significatif pour la performance à l'exercice de modélisation et les loisirs artistiques pratiqués fréquemment à l'âge adulte : $\chi^2(6) = 3,82$; $p = 0,700$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance liée aux pratiques de loisirs artistiques à l'âge adulte entre les étudiants de notre échantillon pour la modélisation volumique.

20.10 Hypothèse MV9 : La performance en modélisation volumique est liée au niveau d'anglais.

Les 129 étudiants ayant participé à l'expérimentation ont été évalués en anglais grâce à une version abrégée du TOEIC. La moyenne des scores est à 61,16 et l'écart-type est 14,50. Les statistiques descriptives de ces scores sont présentées dans le tableau 97.

Tableau 97. Statistiques descriptives des scores de TOEIC ($N = 129$)

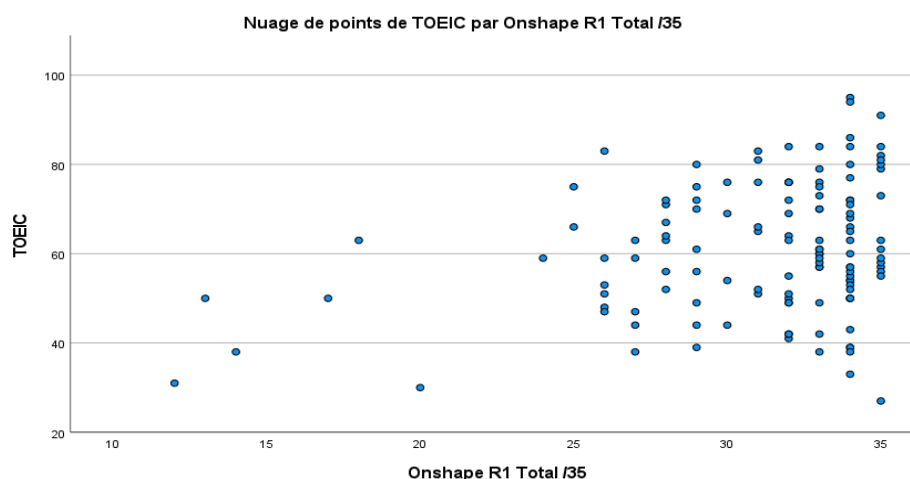
N	129
Moyenne	61,16
Médiane	60,00
Écart type	14,497
Minimum	27
Maximum	95

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = score le plus faible observé, Maximum = score le plus élevé observé, Moyenne = moyennes des scores observé, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs. Ce tableau présente la tendance centrale et l'étendu des scores de TOEIC.

La plateforme de modélisation Onshape utilisée dans notre expérimentation est en anglais au moment de la prise de données. Nous souhaitons vérifier s'il existe une relation entre le niveau d'anglais et leur performance à l'exercice de modélisation. Pour tester cette hypothèse, nous allons vérifier s'il existe une association linéaire entre les scores du test d'anglais, une version abrégée du TOEIC, que les étudiants ont passé à leur arrivée et les scores de modélisation. Nous optons pour la corrélation de Spearman car notre distribution ne suit pas la loi normale.

Le résultat est significatif : $r_s = 0,195$; $N = 128$; $p = 0,028$. Nous le vérifions à l'aide de nuages de points, illustré dans la figure 65, pour éviter une interprétation erronée (Kinnear et Gray, 2015, p. 290).

Figure 65. Nuage de points des scores de TOEIC et des scores de modélisation



Légende. TOEIC = scores du test de positionnement d'anglais ; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

La dispersion des points n'est pas concentrée sur la droite de corrélation. Nous observons des étudiants produisant des scores en anglais faibles et des scores de modélisation élevés, des étudiants forts en anglais et en modélisation. Au vu de cette dispersion et du faible coefficient de corrélation ($r_s = 0,195$), nous ne pouvons pas retenir la corrélation entre scores au test de positionnement d'anglais et scores de modélisation.

20.11 Hypothèse MV10 : La capacité à produire les six volumes fonctionnels est liée aux scores spatiaux.

Dans leur étude sur les stratégies de modélisation, Lang *et al.* (1991, p. 260) évaluent la performance de leurs sujets, notamment en évaluant leur capacité à terminer la tâche dans le temps imparti. La pièce à modéliser est formée de six volumes fonctionnels. Nous avons relevé le nombre de volumes fonctionnels réalisés par les étudiants dans le temps imparti. Nous allons vérifier la relation entre capacité à réaliser la tâche et performance spatiale en comparant le nombre de volumes produit avec les scores spatiaux des étudiants.

Les statistiques descriptives, décrites dans le tableau 98, et la table des fréquences, tableau 99, montrent que 79% des étudiants ont réussi l'exercice et que la moyenne des volumes produits est de 5,44.

Tableau 98. Statistiques descriptives du nombre de volumes fonctionnels

N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Médiane
129	0	6	5,44	1,32	6

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = nombre de volumes fonctionnels le plus faible observé, Maximum = nombre de volumes fonctionnels le plus élevé observé, Moyenne = moyenne du nombre de volumes fonctionnels observés, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs, Médiane = valeur qui sépare la moitié inférieure du nombre de volumes fonctionnels de la moitié supérieure du nombre de volumes fonctionnels.

Ce tableau présente les statistiques descriptives des étudiants en fonction du nombre de volumes fonctionnels produit. En moyenne, les étudiants produisent 5 volumes sur les 6 attendus.

Tableau 99. Table de fréquence du nombre de volumes fonctionnels

	Nombre de volumes							Total
	0	1	2	3	4	5	6	
<i>n</i>	3	1	4	3	8	8	102	129
%	2,3	0,8	3,1	2,3	6,2	6,2	79,1	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants en fonction du nombre de volumes fonctionnels produits.

Environ 80% de notre échantillon a produit les 6 volumes fonctionnels attendus.

Le nombre de volumes fonctionnels produits nous permet de répartir les étudiants dans des catégories selon leur production, indicateur de leur capacité à réaliser la tâche. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 100.

Tableau 100. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de volumes fonctionnels

Test	<i>N</i>	$\chi^2(6)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	10,86	0,093
R PSVT:R1	129	11,12	0,083
MRT1	129	7,39	0,287
MCT1	129	10,40	0,109

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de volumes fonctionnels et la significativité du résultat.

Les résultats du test ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance entre étudiants de notre échantillon pour ces tests.

Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat très significatif : $F(6,122) = 3,59$; $p = 0,003$. Il existe une différence de performance en modélisation entre les étudiants notre échantillon selon leur performance au CFT1. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A40 en annexe, semble indiquer une capacité à produire le nombre de volumes attendu croissant avec les scores au CFT1, à l'exception de la catégorie 2 volumes dont l'effectif ($n = 4$) est cependant faible.

20.12 Hypothèse MV11 : La performance en modélisation volumique est liée aux scores spatiaux.

Nous souhaitons maintenant vérifier si la justesse des modélisations est liée à l'habileté spatiale des étudiants. La justesse d'une modélisation peut être appréciée au travers de la justesse des dimensions et de la géométrie (Branoff et Dobelis, 2012a, p. 25.548.6; Lang *et al.*, 1991, p. 260; Steinhauer, 2012, p. 47). Notre évaluation reprend ces éléments auxquels sont ajoutés des éléments de fonctionnalité, décrits dans la figure 49, p. 151.

La relation entre habileté spatiale et performance en modélisation a été explorée à l'aide de tests de visualisation spatiale : le MCT (Hamlin *et al.*, 2006, p. 11.493.3; Sorby, 1999b, p. 4.465.3; Steinhauer, 2012, p. 44), le PSVT:R de Guay (1976) (Hamlin *et al.*, 2006, p. 11.493.3; Sorby, 1999b, p. 4.465.3) et les *Differential Aptitude Tests* de Bennett *et al.* (1947) (Sorby, 1999b, p. 4.465.3). Nous souhaitons vérifier la conformité de ces résultats pour notre échantillon et les compléter en explorant la relation entre performance en modélisation et orientation spatiale.

Pour tester la relation entre capacité à modéliser avec justesse et habileté spatiale, nous allons vérifier s'il existe une association linéaire entre les scores de modélisation et les scores des tests spatiaux. Nous optons pour la corrélation de Spearman car la distribution des scores de modélisation ne suit pas la loi normale. Les résultats pour les analyses de corrélation des cinq tests spatiaux sont décrits dans le tableau 101.

Tableau 101. Corrélation de Spearman pour les scores de modélisation et les scores du PSVT:V1, du R PSVT:R1, du MRT1, du MCT1 et du CFT1

Variable dépendante	Variable dépendante	r_s	N
Score de modélisation	PSVT:V1	0,301**	126
	R PSVT:R1	0,315**	128
	MRT1	0,216*	128
	MCT1	0,356**	128
	CFT1	0,309**	128

Légende. r_s = coefficient de Spearman ; N = nombre d'étudiants

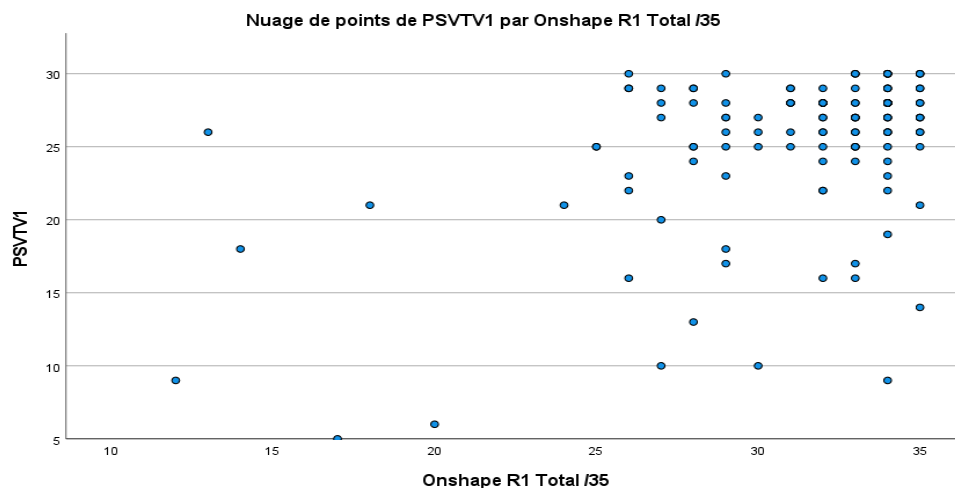
* $p < .05$; ** $p < .01$.

Ce tableau indique les résultats l'analyse de corrélation entre la performance au PSVT:V1, R PSVT:R1, MRT1, au MCT1 et au CFT1 et la performance à l'exercice de modélisation.

Toutes les corrélations sont significatives.

La corrélation de Spearman est très significative pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MCT1 et le CFT1. Elle est significative pour le MRT1. Nous présentons ci-dessous les nuages de points, figures 66 à 70, correspondant à ces corrélations.

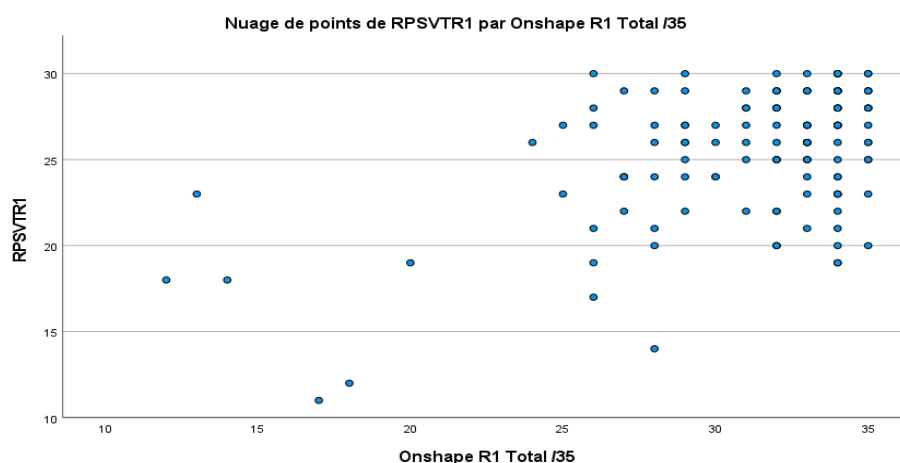
Figure 66. Nuage de points des scores de PSVT:V1 et des scores de modélisation



Légende. PSVTV1 = scores du PSVT:V1 ; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Les valeurs sont concentrées autour de l'axe de pour les scores de modélisation à partir de 25, c.-à-d. 94% des étudiants. On remarque cependant une dizaine de sujets dont les scores d'Onshape sont compris entre 25 et 30 mais dont les scores de PSVT:V1 sont inférieurs à 20.

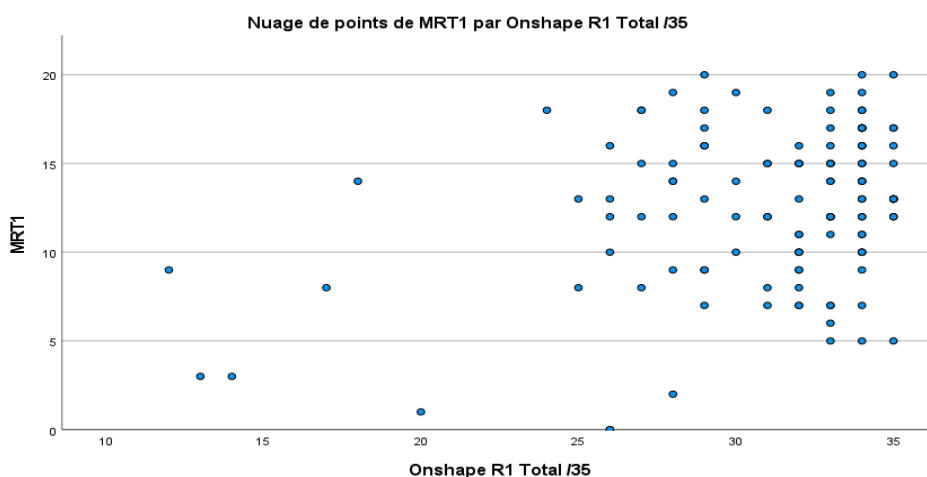
Figure 67. Nuage de points des scores de R PSVT:R1 et des scores de modélisation



Légende. RPSVTR1 = scores du R PSVT:R1 ; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation.

Les valeurs sont concentrées autour de l'axe de pour les scores de modélisation à partir de 25, c.-à-d. 94% des étudiants. On remarque cependant une dizaine de sujets dont les scores de R PSVT:R1 sont supérieurs à 25 mais dont les scores de modélisation sont inférieurs ou égaux à 30.

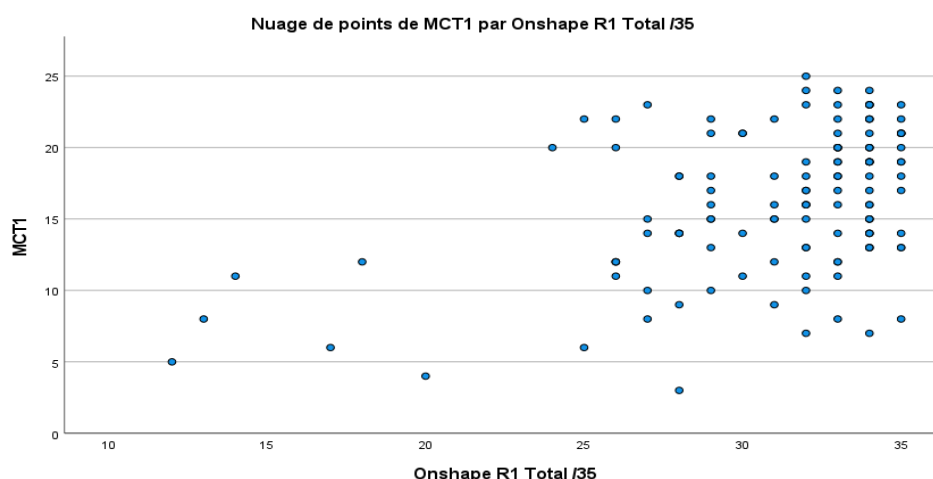
Figure 68. Nuage de points des scores de MRT1 et des scores de modélisation



Légende. MRT1 = scores du MRT1; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Les valeurs sont concentrées autour de l'axe de pour les scores de modélisation à partir de 25, c.-à-d. 94% des étudiants. On remarque cependant une dizaine de sujets dont les scores de MRT1 sont supérieurs ou égaux à 15 mais dont les scores de modélisation sont inférieurs ou égaux à 30 et une quinzaine d'étudiants dont les scores de modélisation sont supérieurs à 30 mais dont les scores de MRT1 sont inférieurs ou égaux à 10.

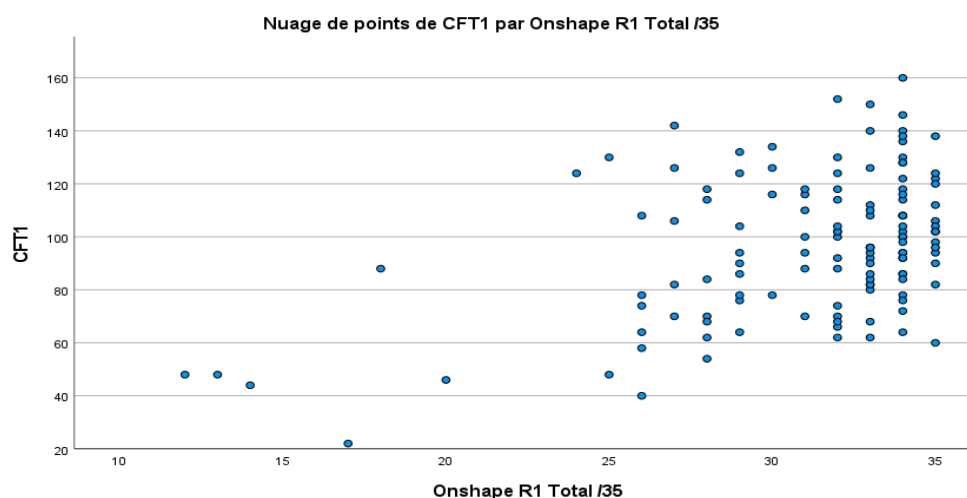
Figure 69. Nuage de points des scores de MCT1 et des scores de modélisation



Légende. MCT1= scores du MCT1 ; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Les valeurs sont concentrées autour de l'axe de pour les scores de modélisation à partir de 25, c.-à-d. 94% des étudiants. On remarque cependant une dizaine de sujets dont les scores d'Onshape sont compris entre 25 et 30 mais dont les scores de MCT1 sont inférieurs à 10 et une dizaine d'étudiants dont les scores de MCT1 sont supérieurs ou égaux à 20 mais dont les scores de modélisation sont inférieurs à 30.

Figure 70. Nuage de points des scores de CFT1 et des scores de modélisation



Légende. CFT1= scores du CFT1; Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1.

Les valeurs sont concentrées autour de l'axe de pour les scores de modélisation à partir de 25, c.-à-d. 94% des étudiants. On remarque cependant une dizaine de sujets dont les scores de CFT1 sont supérieurs à 120 mais dont les scores de modélisation sont inférieurs ou égaux à 30.

On peut comprendre les corrélations significatives mais faibles entre performance à l'exercice de modélisation et scores spatiaux grâce aux nuages de points : les valeurs sont concentrées autour de l'axe de corrélation avec cependant des variations importantes selon les tests. Cette dispersion assez large tout au long de la progression explique que ces corrélations soient significatives mais faibles.

20.13 Hypothèse MV12 : Le nombre de cercles produits est lié aux scores spatiaux.

Les volumes de la pièce sont basés sur 6 cercles : 3 pour la forme générale de la pièce et 3 pour les perçages. À exception de la rainure de la clavette, chaque forme 2D constituant les six volumes fonctionnels de la pièce contient au moins un cercle : chaque esquisse contiendra au moins un cercle à moins de ne contenir que les éléments de construction de la rainure. On attend un nombre minimal de cercles de six si la pièce est réalisée à partir d'une esquisse unique. Les volumes fonctionnels, décrits dans la figure 48 p. 149, s'ils sont produits à l'aide d'une esquisse par volumes, peuvent être réalisés à partir de sept cercles :

- deux cercles pour le volume triangulaire A ;
- deux cercles pour le volume triangulaire B ;
- un cercle pour le perçage symétrique A ;
- un cercle pour le perçage symétrique B ;
- un cercle pour le perçage central.

Un nombre de cercles supérieur à sept indique un manque de planification de l'activité de modélisation. Nous faisons l'hypothèse que cette capacité à planifier la modélisation est liée à l'habileté spatiale.

Les statistiques descriptives, décrites dans le tableau 102, et la table des fréquences, tableau 103, montrent que 67,4% des étudiants ont produit le nombre de cercles attendu (6 et 7) et que la moyenne des cercles produits est de 7,16.

Tableau 102. Statistiques descriptives du nombre de cercles

N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Médiane
129	5	11	7,16	1,21	7,00

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = nombre de cercles le plus faible observé, Maximum = nombre de cercles le plus élevé observé, Moyenne = moyenne du nombre de cercles observés, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs, Médiane = valeur qui sépare la moitié inférieure du nombre de cercles produits de la moitié supérieure du nombre de cercles produits.

Ce tableau présente les statistiques descriptives du nombre de cercles.

Tableau 103. Table de fréquence du nombre de cercles

	Nombre de cercles							Total
	5	6	7	8	9	10	11	
n	1	43	44	28	3	8	2	129
%	0,8	33,3	34,1	21,7	2,3	6,2	1,6	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants en fonction du nombre de cercles produits. La majorité des étudiants produit entre 6 (33%) et 7 cercles (34%).

Le nombre de cercles produits nous permet de répartir les étudiants dans des catégories selon leur production, indicateur de leur capacité à planifier la tâche. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 104.

Tableau 104. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de cercles

Test	<i>N</i>	$\chi^2(6)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	2,01	0,919
R PSVT:R1	129	3,10	0,796
MRT1	129	5,25	0,512
MCT1	129	6,35	0,385

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre de cercles et la significativité du résultat.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat non significatif : $F(6,122) = 1,84$; $p = 0,096$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre le nombre de cercles produits et les scores aux tests spatiaux pour les étudiants de notre échantillon.

20.14 Hypothèse MV13 : Le nombre d'esquisses produites est lié aux scores spatiaux.

La pièce est constituée de six volumes fonctionnels. Elle peut être réalisée à partir d'une esquisse unique. Les enseignants d'ISAE-Supméca recommandent de créer une esquisse par volume fonctionnel. On attend un nombre d'esquisses compris entre un et six. Un nombre d'esquisses supérieur à six indique un manque de planification de l'activité de modélisation. Nous faisons l'hypothèse que cette capacité à planifier la modélisation est liée à l'habileté spatiale.

Les statistiques descriptives, décrites dans le tableau 105, et la table des fréquences, tableau 106, montrent que 98,4% des étudiants ont produit le nombre d'esquisses attendu, compris entre un et six, et que la moyenne d'esquisses produites est de 3,22.

Tableau 105. Statistiques descriptives du nombre d'esquisses

<i>N</i>	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Médiane
129	1	9	3,22	1,43	3,00

Légende. *N* = nombre d'étudiants, Minimum = nombre d'esquisses le plus faible observé, Maximum = nombre d'esquisses le plus élevé observé, Moyenne = moyenne du nombre d'esquisses observées, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs, Médiane = valeur qui sépare la moitié inférieure du nombre d'esquisses produites de la moitié supérieure du nombre d'esquisses produites.

Ce tableau présente les statistiques descriptives du nombre d'esquisses.

Tableau 106. Table de fréquence du nombre d'esquisses

	Nombre d'esquisses								Total
	1	2	3	4	5	6	7	9	
<i>N</i>	14	31	28	34	17	3	1	1	129
%	10,9	24,0	21,7	26,4	13,2	2,3	0,8	0,8	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants en fonction du nombre de d'esquisses produites.

La majorité des étudiants produit entre 2 et 4 esquisses.

Le nombre d'esquisses produites nous permet de répartir les étudiants dans des catégories selon leur production, indicateur de leur capacité à planifier la tâche. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 107.

Tableau 107. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre d'esquisses

Test	<i>N</i>	$\chi^2(7)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	10,44	0,165
R PSVT:R1	129	6,41	0,492
MRT1	129	4,01	0,778
MCT1	129	4,94	0,667

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre d'esquisses et la significativité du résultat.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat non significatif : $F(7,121) = 0,53$; $p = 0,813$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre le nombre d'esquisses produites et les scores spatiaux des étudiants de notre échantillon.

20.15 Hypothèse MV14 : Le nombre d'extrusions produites est lié aux scores spatiaux.

La pièce est constituée de six volumes fonctionnels. Elle peut être réalisée à partir d'une esquisse unique à laquelle on applique deux extrusions. Les enseignants d'ISAE-Supméca recommandent de créer une esquisse et une extrusion par volume fonctionnel. On attend un nombre d'extrusions compris entre deux et six. Un nombre d'extrusions supérieur à six indique un manque de planification de l'activité de modélisation. Nous faisons l'hypothèse que cette capacité à planifier la modélisation est liée à l'habileté spatiale.

Les statistiques descriptives, décrites dans le tableau 108, et la table des fréquences, tableau 109, montrent que 93,8% des étudiants ont produit le nombre d'extrusions attendu, compris entre deux et six, et que la moyenne des volumes produits est de 4,01.

Tableau 108. Statistiques descriptives du nombre d'extrusions

<i>N</i>	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Médiane
129	0	15	4,01	2,11	4,00

Légende. *N* = nombre d'étudiants, Minimum = nombre d'extrusions le plus faible observé, Maximum = nombre d'extrusions le plus élevé observé, Moyenne = moyenne du nombre d'extrusions observées, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs, Médiane = valeur qui sépare la moitié inférieure du nombre d'extrusions produites de la moitié supérieure du nombre d'extrusions produites.

Ce tableau présente les statistiques descriptives du nombre d'extrusions.

Tableau 109. Table de fréquence du nombre d'extrusions

	Nombre d'extrusions													Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	11	13	14	15	
<i>n</i>	1	1	19	36	37	20	9	1	1	1	1	1	1	129
%	0,8	0,8	14,7	27,9	28,7	15,5	7,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants en fonction du nombre d'extrusions produites.

La majorité des étudiants produit entre 2 et 5 extrusions.

Le nombre d'extrusions produites nous permet de répartir les étudiants dans des catégories selon leur production, indicateur de leur capacité à planifier la tâche. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 110.

Tableau 110. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre d'extrusions

Test	<i>N</i>	$\chi^2(12)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	16,90	0,154
R PSVT:R1	129	14,15	0,291
MRT1	129	9,46	0,663
MCT1	129	13,63	0,325

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le nombre d'extrusions et la significativité du résultat.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ne sont pas significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat non significatif : $F(12,116) = 1,57$; $p = 0,111$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre le nombre d'extrusions produites et les scores spatiaux pour les étudiants de notre échantillon.

20.16 Hypothèse MV15 : La stratégie de perçage de la clavette est liée aux scores spatiaux.

L'échantillon est composé de $N_{NR} = 111$ [86,0%] étudiants perçant directement et $N_{NR} = 18$ [14,0%] étudiants rebouchant le perçage central lorsqu'ils modélisent la clavette.

Le perçage direct de la clavette indique la capacité à analyser les volumes constitutifs de la pièce pour sélectionner la surface à extruder.

Le test de Mann-Whitney le genre indique un résultat non significatif pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau 111.

Tableau 111. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la stratégie de perçage de la clavette

Test	N	U	p
PSVT:V1	127	793	0,190
R PSVT:R1	129	735,5	0,072
MRT1	129	819,5	0,221
MCT1	129	904,5	0,520

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et le genre, ainsi que la significativité du résultat.

Le test de Student pour le CFT1 indique un résultat non significatif : $t(127) = 0,61$; $p = 0,545$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance aux tests spatiaux selon que les étudiants percent directement ou pas.

20.17 Hypothèse MV16 : La catégorie Nombre de volumes – perçage est liée aux scores spatiaux.

En associant le nombre de volumes fonctionnels produits et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes selon la stratégie de perçage. La typologie et la distribution de ces catégories sont décrites dans le tableau 112.

Tableau 112. Définition et distribution des catégories Nombre de volumes - perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Perçage de la clavette	n	%
A	6	Direct	89	69,0
B	6	Rebouche	13	10,1
C	<6	Direct	22	17,1
D	<6	Rebouche	5	3,9
Total			129	100

Légende. n = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets ; < = inférieur à.

Ce tableau présente la distribution des étudiants selon les catégories liant performance, telle qu'évaluée au travers du nombre de volumes fonctionnels, et stratégie de perçage.

70% des étudiants produisent le nombre de volumes attendus et adoptent une stratégie de perçage efficace.

Nous souhaitons vérifier si ces catégories sont liées à la performance spatiale des étudiants.

Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat significatif : $F(3,125) = 3,37$; $p = 0,021$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrée dans la figure A41 en annexe, montre que les

étudiants de la catégorie C, c'est-à-dire les étudiants qui ne parviennent pas à réaliser les six volumes et qui percent directement, obtiennent des scores inférieurs au CFT1.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, décrits dans le tableau 113, ne sont pas significatifs. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre la performance à ces tests et les catégories Nombre de volumes – perçage.

Tableau 113. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie Nombre de volumes - perçage

Test	N	$\chi^2(3)$	p
PSVT:V1	127	3,73	0,292
R PSVT:R1	129	6,03	0,110
MRT1	129	2,28	0,649
MCT1	129	4,45	0,217

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, p = valeur de p
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie Nombre de volumes-perçage et la significativité du résultat.

20.18 Hypothèse MV17 : La catégorie Nombre de volumes – esquisses – perçage est liée aux scores spatiaux.

Le nombre d'esquisses peut être dû à la stratégie de perçage (voir figure 52 p. 155). En associant le nombre de volumes produits, le nombre d'esquisses et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie de dessin et de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes selon la stratégie de dessin, qui sont sous-divisés en deux groupes selon la stratégie de perçage. La typologie et la distribution de ces catégories sont décrites dans le tableau 114.

Tableau 114. Définition et distribution des catégories Nombre de volumes – esquisses - perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Nombre d'esquisses	Perçage de la clavette	n	%
A	6	<= 6	Direct	96	74,4
B	6	<= 6	Rebouché	5	3,9
C	6	>6	Direct	0	0,0
D	6	>6	Rebouché	1	0,8
E	<6	<= 6	Direct	21	16,3
F	<6	<= 6	Rebouché	5	3,9
G	<6	>6	Direct	1	0,8
H	<6	>6	Rebouché	0	0,0
Total				129	100

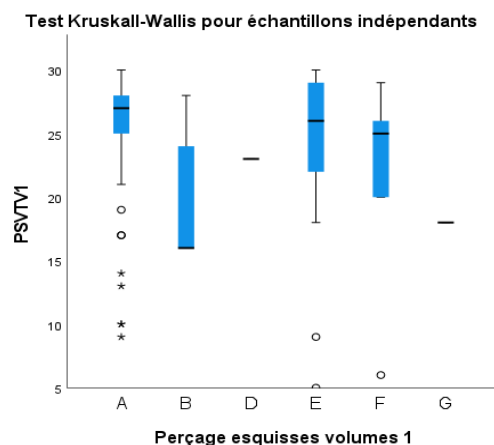
Légende. n = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets ; < = inférieur à, <= = inférieur ou égal à, > = supérieur à.

Ce tableau présente la distribution des étudiants selon les catégories liant performance, telle qu'évaluée au travers du nombre de volumes fonctionnels, nombre d'esquisses et stratégie de perçage.

74% des étudiants produisent le nombre de volumes et d'esquisses attendus et adoptent une stratégie de perçage efficace.

Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat significatif pour le PSVT:V1 : $\chi^2(5) = 11,15$; $p = 0,049$. L'observation des boîtes à moustache, illustrées dans la figure 71, indique une performance au PSVT:V1 croissante avec l'efficacité de la stratégie de dessin et de perçage adoptée, à l'exception de la catégorie B, c'est-à-dire les étudiants qui produisent les six volumes fonctionnels attendus avec un nombre d'esquisses attendu mais qui rebouchent le perçage central.

Figure 71. Distribution des scores du PSVT:V1 selon catégorie Nombre de volumes – esquisses - perçage



Légende. PSVT:V1 = scores obtenus au PSVT:V au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de dessin et de perçage adoptée au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V1 des étudiants selon le nombre de volumes fonctionnels et d'esquisses qu'ils ont produits, et en tenant compte de leur stratégie de perçage.

Les scores du PSVT:V1 semblent décroître avec la diminution d'efficacité de la stratégie de dessin et de perçage adoptée au premier recueil, à l'exception de la catégorie B, dont la performance est la plus faible de toutes les catégories.

La consultation du tableau de comparaisons appariées produit par SPSS indique que la significativité du résultat concerne la comparaison entre les catégories B et A.

Tableau 115. Comparaisons appariées des catégories Nombre de volumes – esquisses - perçage

Échantillon 1- Échantillon 2	Statistiques de test	Erreur standard	Statistiques de test standard	<i>p</i>	Sig. Sig. ^a
G-D	11,500	51,646	0,223	0,824	1,000
G-B	14,700	40,005	0,367	0,713	1,000
G-F	28,500	40,005	0,712	0,476	1,000
G-E	44,929	37,379	1,202	0,229	1,000
G-A	54,420	36,713	1,482	0,138	1,000
D-B	3,200	40,005	0,080	0,936	1,000
D-F	-17,000	40,005	-0,425	0,671	1,000
D-E	-33,429	37,379	-0,894	0,371	1,000
D-A	42,920	36,713	1,169	0,242	1,000
B-F	-13,800	23,097	-0,597	0,550	1,000
B-E	-30,229	18,173	-1,663	0,096	1,000
B-A	39,720	16,761	2,370	0,018	0,267
F-E	16,429	18,173	0,904	0,366	1,000
F-A	25,920	16,761	1,546	0,122	1,000
E-A	9,492	8,815	1,077	0,282	1,000

Légende. *p* = valeur de *p*.

Note. Ce tableau est produit par SPSS.

Chaque ligne teste l'hypothèse nulle selon laquelle les distributions Échantillon 1 et Échantillon 2 sont égales.

Les significations asymptotiques (tests bilatéraux) sont affichées. Le niveau de signification est de ,050.

a. Les valeurs de signification ont été ajustées par la correction Bonferroni pour plusieurs tests.

Étant donné le faible effectif de la catégorie B ($n = 5$), nous considérons qu'il n'est pas représentatif de notre échantillon et décidons de ne pas retenir ce résultat.

Le résultat de l'ANOVA pour le CFT1 est significatif : $F(5,123) = 2,92$; $p = 0,016$. L'observation des boîtes à moustache, illustrées dans la figure A42 en annexe, semble indiquer une performance supérieure à ce test des catégories A et B, c'est-à-dire les étudiants qui produisent un nombre d'esquisses attendu et les six volumes fonctionnels attendus, en perçant directement pour la catégorie A ($n = 96$) et indirectement pour la catégorie B ($n = 5$).

Les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, décrits dans le tableau A30 en annexe, ne sont pas significatifs.

20.19 Hypothèse MV18 : La catégorie Nombre de volumes – extrusions - perçage est liée aux scores spatiaux.

Le nombre d'extrusions peut être dû à la stratégie de perçage (voir figure 52 p. 155). En associant le nombre de volumes produits, le nombre d'extrusions et la stratégie de perçage, nous composons des catégories liées à la réussite de la stratégie d'extrusion et de perçage adoptée. Les étudiants sont séparés en deux groupes de performance, selon que le nombre de volumes à produire est atteint ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes selon le nombre

d'extrusions, qui sont sous-divisés en deux groupes selon la stratégie de perçage. La typologie et la distribution de ces catégories sont décrites dans le tableau 116.

Tableau 116. Définition et distribution des catégories Nombre de volumes – extrusions – perçage

Catégorie	Nombre de volumes	Nombre d'extrusions	Perçage de la clavette	<i>n</i>	%
A	6	$x \leq 6$	Direct	88	68,2
B	6	$x \leq 6$	Rebouché	11	8,5
C	6	> 6	Direct	1	0,8
D	6	> 6	Rebouché	2	1,6
E	< 6	$x \leq 6$	Direct	19	14,7
F	< 6	$x \leq 6$	Rebouché	5	3,9
G	< 6	> 6	Direct	3	2,3
H	< 6	> 6	Rebouché	0	0
Total				120	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets ; $<$ = inférieur à, \leq = inférieur ou égal à, $>$ = supérieur à.

Ce tableau présente la distribution des étudiants selon les catégories liant performance, telle qu'évaluée au travers du nombre de volumes fonctionnels, nombre d'esquisses et stratégie de perçage.

68% des étudiants produisent le nombre de volumes et d'extrusions attendus et adoptent une stratégie de perçage efficace.

Le résultat de l'ANOVA pour le CFT1 est significatif : $F(6,122) = 2,63$; $p = 0,020$. L'observation des boîtes à moustache, illustrées dans la figure A43 en annexe, semble indiquer une performance supérieure à ce test des catégories A et B, c'est-à-dire les étudiants qui produisent un nombre d'extrusions attendu et les six volumes fonctionnels attendus, en perçant directement pour la catégorie A ($n = 96$) et indirectement pour la catégorie B ($n = 5$). La catégorie E, soit la troisième catégorie dont les effectifs sont supérieurs à 8%, obtient la performance la plus faible à ce test : elle représente les étudiants qui produisent un nombre d'extrusions élevé en perçant directement la clavette mais qui ne parviennent pas à produire les six volumes fonctionnels attendus.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1, décrits dans le tableau A31 en annexe, ne sont pas significatifs. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre performance à ces tests et les catégories Nombre de volumes – extrusions – perçage.

20.20 Hypothèse MV19 : La stratégie de longueur totale est liée aux scores spatiaux.

La longueur totale de la pièce peut être définie de plusieurs façons. Nous observons dans les esquisses trois types de stratégies de définition de la longueur totale :

- la longueur totale est décomposée en différents éléments cotés individuellement (figure 51, p. 153) ;
- la distance est définie entre les deux extrémités de la pièce (figure 50, p. 153) ;
- la distance totale n'est pas définie.

L'échantillon est composé de $N_C = 94$ [86,0%] étudiants calculant la distance totale, $N_D = 18$ [14,0%] étudiants définissant la longueur entre les deux extrémités et $N_{ND} = 17$ [13,2%] étudiants ne définissant pas la longueur totale.

Nous souhaitons vérifier si la stratégie de définition de la longueur totale est liée à la performance des étudiants. La stratégie de définition de la longueur totale nous permet de répartir les étudiants dans des catégories. Le nombre de ces catégories étant supérieur à deux, nous optons pour l'ANOVA pour le CFT1, et le test de Kruskal-Wallis, pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 117.

Tableau 117. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la stratégie de définition de la longueur totale

Test	N	$\chi^2(2)$	p
PSVT:V1	127	9,32	0,009
R PSVT:R1	129	12,30	0,002
MRT1	129	6,02	0,049
MCT1	129	12,78	0,004

Légende. N = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la stratégie de définition de la longueur totale et la significativité du résultat.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont très significatifs pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, et le MCT1 et significatifs pour le MRT1. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat très significatif : $F(2,126) = 5,91$; $p = 0,004$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figures A44-A48 en annexe, montre que la catégorie d'étudiants calculant la longueur totale obtient les meilleurs scores aux tests spatiaux, suivie de celle définissant la longueur totale entre les deux extrémités, puis des étudiants ne définissant pas la longueur totale pour le MRT1, le MCT1 et le CFT1. Les catégories d'étudiants définissant la longueur totale, quelle que soit la stratégie adoptée, performant mieux au PSVT:V1 et au R PSVT:R1.

20.21 Hypothèse MV20 : La capacité à contraindre la symétrie de la pièce est liée aux scores spatiaux.

La symétrie de la pièce a été définie ou pas par les étudiants. Nous souhaitons vérifier s'il existe un lien entre l'application correcte de cette contrainte dimensionnelle et la performance spatiale des étudiants.

L'échantillon est composé de $N_{PS} = 43$ [33,3%] étudiants ayant correctement défini la symétrie et $N_D = 86$ [66,7%] étudiants ne l'ayant pas définie ou pas définie correctement.

Le test de Mann-Whitney indique un résultat très significatif le MCT1, un résultat significatif pour le PSVT:V1, un résultat faiblement significatif pour le R PSVT:R1 et un résultat non significatif pour le MRT1. Ces résultats sont décrits dans le tableau 118.

Tableau 118. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la symétrie de la pièce

Test	N	U	p
PSVT:V1	127	2243	0,025
R PSVT:R1	129	2239,5	0,050
MRT1	129	2217,5	0,065
MCT1	129	2458	0,002

Légende. N = nombre d'étudiants, U = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, p = valeur de p .

Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la symétrie de la pièce et la significativité du résultat.

Le test de Student indique un résultat très significatif pour le CFT1 : $t(127) = -3,50$; $p < 0,001$.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figures A49-A52 en annexe, semble indiquer que la catégorie d'étudiants ayant défini la symétrie correctement performe mieux au PSVT:V1, R PSVT:R1, MCT1 et CFT1. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre performance au MRT1 et capacité à contraindre la symétrie.

20.22 Hypothèse MV21 : La catégorie Longueur totale - Symétrie est liée aux scores spatiaux.

En combinant les catégories d'efficacité de la définition de la longueur totale et les catégories de réussite de la symétrie, on peut catégoriser les étudiants en deux groupes de performance, selon que la longueur totale est correcte ou pas, qui sont sous-divisés en deux groupes de performance quant à la définition de la symétrie, qui sont sous-divisés en deux groupes de stratégies de définition de la longueur totale. Les étudiants sont répartis dans les groupes selon les distributions décrites dans le tableau 119 :

Tableau 119. Typologie et distribution de la catégorie L totale - Symétrie

Catégorie	L totale	Symétrie	Stratégie de définition de L totale	n	%
1	correcte	correcte	calculée	50	38,8
	correcte	correcte	distance extrémités		
2	correcte	incorrecte	calculée	14	10,9
	correcte	incorrecte	distance extrémités		
3	incorrecte	correcte	calculée	36	27,9
4	incorrecte	incorrecte	non définie	17	13,2
5	incorrecte	incorrecte	calculée	12	9,3
Total				129	100

Légende. n = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets ; L totale = longueur totale.

Ce tableau présente la distribution des étudiants selon les catégories liant la correction des cotes longueur totale et symétrie et la stratégie de définition de la longueur totale.

39% des étudiants contraignent correctement la longueur totale et la symétrie de la pièce.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont décrits dans le tableau 120.

Tableau 120. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie L Totale - Symétrie

Test	<i>N</i>	$\chi^2(4)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	9,82	0,044
R PSVT:R1	129	14,60	0,006
MRT1	129	7,09	0,131
MCT1	129	15,45	0,004

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie L Totale - Symétrie et la significativité du résultat.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont très significatifs pour le R PSVT:R1 et le MCT1 et significatif pour le PSVT:V1. Pour le CFT1, l'ANOVA indique un résultat très significatif : $F(4,124) = 4,67$; $p = 0,002$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figures A53-A56 en annexe, montre que les étudiants de la catégorie 4, c'est-à-dire les étudiants qui ne définissent pas la longueur totale et qui ne définissent pas correctement la symétrie de la pièce obtiennent des scores au PSVT:V1, R PSVT:R1, MCT1 et CFT1 plus faibles. De plus, les catégories 1, 2 et 3, c'est-à-dire les catégories qui définissent la longueur totale, correctement ou pas, obtiennent les meilleurs scores à ces tests. La catégorie 5, dont les cotes longueur totale et symétrie sont incorrectes mais calculées, obtiennent des scores inférieurs aux catégories 1 à 3, mais supérieurs à la catégorie 4.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis n'est pas significatif pour le MRT1 : $\chi^2(4) = 7,09$; $p = 0,131$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre performance au MRT1 et les catégories L Totale - Symétrie.

20.23 Hypothèse MV22 : La performance en modélisation est liée à la stratégie de perçage de la clavette.

Nous souhaitons investiguer si la performance en modélisation est liée à la stratégie de perçage : les étudiants qui adoptent une stratégie efficace obtiennent-ils de meilleurs scores ? Le test de Mann-Whitney indique un résultat non significatif pour le lien entre la performance à l'exercice de modélisation et la stratégie de perçage de la clavette : $U = 742,5$; $p = 0,078$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre cette stratégie et la performance en modélisation.

20.24 Hypothèse MV23 : La performance en modélisation est liée à la stratégie de longueur totale.

Nous souhaitons investiguer si la performance en modélisation est liée à la stratégie de définition de la longueur totale : les étudiants qui adoptent une stratégie efficace obtiennent-ils de meilleurs scores ? Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat très significatif pour le lien entre la performance à l'exercice de modélisation et la stratégie de longueur totale : $\chi^2(2) = 17,29$; $p < 0,001$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A57 en annexe, indique une performance en modélisation inférieure pour la catégorie d'étudiants ne définissant pas la longueur totale. Cette justesse de la cote longueur totale ne représente qu'un point sur le total de trente-cinq points affectés à notre évaluation de la justesse de la modélisation. La stratégie de définition de cette cote semble entretenir un lien avec la performance en modélisation au-delà de sa contribution au nombre de points total.

20.25 Hypothèse MV24 : La performance en modélisation est liée à la stratégie Longueur totale - symétrie.

Nous souhaitons investiguer si la performance en modélisation est liée à la stratégie Longueur totale – symétrie : les étudiants qui adoptent une stratégie efficace obtiennent-ils de meilleurs scores ? Le test de Kruskal-Wallis indique un résultat très significatif pour le lien entre la performance à l'exercice de modélisation et la stratégie de Longueur totale - Symétrie : $\chi^2(4) = 36,72$; $p < 0,001$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figure A58 en annexe, indique une performance en modélisation inférieure pour la catégorie d'étudiants dont la longueur et la symétrie sont erronées, que la longueur totale soit calculée (catégorie 5) ou non-définie (catégorie 4).

20.26 Récapitulatif des résultats de ce chapitre

Code	Hypothèse	Résultat
MV1	La performance en modélisation volumique est liée au genre.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation volumique entre les hommes et les femmes de notre échantillon.
MV2	Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux à l'exercice de modélisation volumique que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques.	Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux à l'exercice de modélisation volumique que les étudiants sans bagage technologique.
MV3	La performance en modélisation volumique est liée à la prévalence manuelle.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation volumique liée à la prévalence manuelle.
MV4	La performance en modélisation volumique est liée au nombre de langues maternelles.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation volumique liée au nombre de langues maternelles apprises.
MV5	Les étudiants ayant déjà pratiqué des logiciels de modélisation performant mieux à l'exercice de modélisation volumique	La catégorie d'étudiants ayant déjà pratiqué des logiciels de modélisation performe mieux à l'exercice de modélisation volumique.
MV6	La performance en modélisation volumique est liée au nombre de logiciels de modélisation pratiqués.	La performance des catégories d'étudiants selon le nombre de logiciels à l'exercice de modélisation volumique augmente avec le nombre de logiciels de modélisation pratiqués.
MV7	La performance en modélisation volumique est liée à la pratique de certaines catégories de loisirs durant l'enfance et l'adolescence.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation volumique selon la

		pratique de loisirs durant l'enfance et l'adolescence.
MV8	La performance en modélisation volumique est liée à la pratique de certaines catégories de loisirs au moment de la prise de données.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation volumique selon la pratique de loisirs à l'âge adulte.
MV9	La performance en modélisation volumique est liée au niveau d'anglais.	La performance en modélisation volumique n'est pas liée à la performance au test de positionnement anglais.
MV10	La capacité à produire les six volumes fonctionnels attendus est liée aux scores spatiaux.	<ul style="list-style-type: none"> • La capacité à produire les six volumes fonctionnels attendus est liée à la performance au CFT1. • Il n'y pas de différence dans la capacité à produire les six volumes fonctionnels attendus liée aux scores de PSVT:V1, R PSVT:R1, MRT1 et MCT1.
MV11	La performance en modélisation volumique est liée aux scores spatiaux.	Il existe une faible corrélation entre les scores de modélisation et les scores aux tests spatiaux.
MV12	Le nombre de cercles produits est lié aux scores spatiaux.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence dans la capacité à produire le nombre de cercles attendu liée aux scores des tests spatiaux.
MV13	Le nombre d'esquisses produites est lié aux scores spatiaux.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre le nombre d'esquisses produites et les scores spatiaux.
MV14	Le nombre d'extrusions produites est lié aux scores spatiaux.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre le nombre d'extrusions produites et les scores spatiaux.
MV15	La stratégie de perçage de la clavette est liée aux scores spatiaux.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre stratégie de perçage de la clavette et performance aux tests spatiaux.
MV16	La catégorie Nombre de volumes – perçage est liée aux scores spatiaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants qui percent directement la clavette mais qui ne produisent pas le nombre de volumes attendu obtiennent des scores plus faibles au CFT1. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence dans la capacité à produire le nombre de volumes attendu en fonction de la stratégie de perçage liée aux scores de PSVT:V1, R PSVT:R1, MRT1 et MCT1.
MV17	La catégorie Nombre de volumes – esquisses – perçage est liée aux scores spatiaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants qui produisent le nombre d'esquisses et de volumes fonctionnels attendus, quelle que soit

		<p>la stratégie de perçage de la clavette, obtiennent des scores plus élevés au CFT1.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence dans la capacité à produire le nombre de volumes et d'esquisses attendu en fonction de la stratégie de perçage liée aux scores des tests de visualisation spatiale et du PSVT:V1.
MV18	La catégorie Nombre de volumes – extrusions - perçage est liée aux scores spatiaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants qui performant le mieux au CFT produisent le nombre d'extrusions attendu et les six volumes fonctionnels attendus, quelle que soit leur stratégie de perçage. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence dans la capacité à produire le nombre de volumes et d'extrusions attendu en fonction de la stratégie de perçage liée aux scores des autres tests spatiaux.
MV19	La stratégie de longueur totale est liée aux scores spatiaux.	La catégorie d'étudiants qui ne définissent pas la longueur totale obtient des résultats plus faibles aux tests spatiaux que les catégories d'étudiants qui la décomposent ou qui la déterminent à partir des deux extrémités.
MV20	La capacité à contraindre la symétrie est liée aux scores spatiaux.	La catégorie d'étudiants qui ne définissent pas correctement la symétrie de la pièce obtient des résultats plus faibles aux tests spatiaux, à l'exception du MRT1.
MV21	La catégorie Longueur totale-symétrie est liée aux scores spatiaux.	<ul style="list-style-type: none"> • Les catégories d'étudiants qui définissent la longueur totale, correctement ou pas, et dont la symétrie de la pièce est correcte ou pas obtiennent des scores au PSVT:V1, R PSVT:R1, MCT1 et CFT1 plus élevés que les autres sujets. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance au MRT1 quelle que soit la stratégie de définition de la symétrie et de la longueur totale et l'efficacité de cette stratégie.

MV22	La performance en modélisation est liée à la stratégie de perçage de la clavette.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre la stratégie de perçage et performance à l'exercice de modélisation volumique.
MV23	La performance en modélisation est liée à la stratégie de longueur totale.	La catégorie d'étudiants ne définissant pas la longueur totale performant moins bien à l'exercice de modélisation volumique.
MV24	La performance en modélisation est liée à la stratégie Longueur totale - symétrie.	Les étudiants dont la longueur et la symétrie sont erronées, que la longueur totale soit calculée ou non-définie, performant moins bien à l'exercice de modélisation.

20.27 Synthèse des résultats de ce chapitre

Les étudiants qui performant le mieux à l'exercice de modélisation sont caractérisés par les variables extrinsèques suivantes :

- ils sont issus de formations comprenant des enseignements technologiques ;
- ils ont pratiqué un ou des logiciels de modélisation ;
- leur performance semble augmenter avec le nombre de logiciels pratiqués ;
- ils obtiennent majoritairement des scores modérés et élevés aux tests spatiaux.

Ces résultats pourraient être précisés en vérifiant une éventuelle corrélation entre formation technologique et pratique de logiciels de modélisation. Ils confirment cependant la transférabilité des connaissances procédurales d'un logiciel de modélisation à un autre (Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Lang *et al.*, 1991, p. 258).

Ces résultats confirment d'autre part que la performance en modélisation est liée à la visualisation spatiale (Branoff et Dobelis, 2012a, p. 39; Hamlin *et al.*, 2006, p. 11.493.3; Sorby, 1999b, p. 4.465.3; Steinhauer, 2012, p. 44). Nos tests spatiaux incluent des tests visant à mesurer l'habileté spatiale et l'orientation spatiale. Le tableau 121 reprend l'ensemble des résultats significatifs et faiblement significatifs liant performance en modélisation et habileté spatiale et les regroupe autour des deux facteurs spatiaux du cadre de Tarte (1984), soit la visualisation spatiale et l'orientation spatiale, afin d'identifier si ces résultats sont plutôt liés à un de ces facteurs. Le tableau 121 indique pour chaque résultat significatif et faiblement significatif le nombre de test relatifs à ces deux facteurs, et lorsque le nombre est inférieur au total des tests spatiaux concernés (i.e. trois pour la visualisation spatiale et deux pour l'orientation spatiale), le sous-facteur concerné (i.e. rotation mentale ou transformation mentale pour la visualisation spatiale et un tout réorganisé et une partie d'un tout pour l'orientation spatiale). Par exemple, la justesse de la modélisation est liée significativement aux trois tests de visualisation spatiale, dont au moins un résultat faiblement significatif, et aux deux tests d'orientation spatiale.

Tableau 121. Récapitulatif des résultats significatifs et faiblement significatifs des hypothèses MV liées aux scores spatiaux

Variable		Visualisation spatiale		Orientation spatiale	
		Facteur	<i>n</i>	Facteur	<i>n</i>
Performance	Justesse de la modélisation	VS (faible)	3/3	OS (faible)	2/2
	6 volumes attendus produits		0	UT	1/2
	Symétrie correcte	VS (RM faible)	2/3	OS	2/2
Stratégies	Longueur totale	VS	3/3	OS	2/2
Performance et stratégies	Nombre de volumes - perçage		0	UT	1/2
	Nombre de volumes – esquisses - perçage		0	UT	1/2
	Nombre de volumes – extrusions - perçage		0	UT	1/2
	Longueur totale - Symétrie	VS	2/3	OS	2/2

Légende. *n* = nombre de tests ; VS = visualisation spatiale ; OS = orientation spatiale ; UT = une partie d'un tout ; RM = rotation mentale.

Nous pouvons voir à partir des résultats significatifs et faiblement significatifs des hypothèses MV liées aux scores spatiaux regroupés dans le tableau 121 que :

- les étudiants qui performant bien en modélisation volumique ont tendance à obtenir des scores spatiaux élevés ;
- les étudiants qui produisent les six volumes attendus obtiennent de bons scores au test de dissociation ;
- les étudiants qui performant bien aux tests spatiaux définissent la longueur totale de la pièce ;
- les étudiants qui performant bien aux tests spatiaux, à l'exception du MRT1, définissent la symétrie correctement ;
- les étudiants qui performant bien à l'exercice de modélisation et définissent la symétrie et la longueur totale correctement obtiennent de bons scores aux tests spatiaux, avec des résultats toujours significatifs pour les tests d'orientation spatiale et de transformation mentale ;
- les étudiants qui produisent le nombre de volumes fonctionnels et le nombre d'esquisses attendus, quelle que soit la stratégie de perçage de la clavette, obtiennent de bons scores au test de dissociation.

Nous remarquons d'autre part que la performance aux tests spatiaux n'est pas liée au nombre de cercles, d'esquisses et d'extrusions, ni à la stratégie de perçage. Les capacités spatiales semblent intervenir plutôt sur les aspects géométriques de la modélisation que dans la planification de l'activité.

Nous observons de plus de nombreux résultats significatifs liant la performance en modélisation et la performance au CFT, notamment en raison du résultat significatif entre performance au CFT et capacité à produire le nombre de volumes fonctionnels attendu. Ce test nécessite la

capacité à extraire un élément intriqué dans un motif complexe. Nos résultats suggèrent que cette compétence est utile pour modéliser des objets, tâche qui requiert l'extraction d'éléments à partir d'une représentation d'un objet et la création d'éléments constitutifs d'un ensemble complexe.

Les étudiants issus de formations incluant des enseignements technologiques performant mieux à l'exercice de modélisation volumique que les étudiants issus de formations ne comprenant pas d'enseignements technologiques. Les étudiants ayant déjà pratiqué des logiciels de modélisation performant mieux que les novices. La performance des catégories d'étudiants selon le nombre de logiciels à l'exercice de modélisation volumique augmente avec le nombre de logiciels de modélisation pratiqués, suggérant que la pratique de modeleurs volumiques variés augmente les compétences de modélisation.

Le genre, la prévalence manuelle, le niveau d'anglais, le nombre de langues maternelles apprises et les loisirs n'ont pas d'effet sur la performance en modélisation. L'absence de résultat concernant les loisirs et la présence de résultats significatifs liant la performance en modélisation et la pratique de logiciels de modélisation et l'apprentissage de contenus technologiques suggèrent que les compétences de modélisation sont acquises au travers d'un apprentissage formel spécifique.

Chapitre 21. Évolutions en habileté spatiale suite à des enseignements en école d'ingénieurs spécialisée en mécanique

Dans ce chapitre, nous allons éprouver les hypothèses relatives à l'Évolution de l'Habileté Spatiale EHS1-EHS15 explorant la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles, la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et enseignements reçus au premier semestre et la relation entre évolution en performance aux tests spatiaux et stratégies de résolution. Les hypothèses EHS1-EHS15 concernent les variables extrinsèques à notre mesure de l'habileté spatiale :

- genre ;
- formation ;
- prévalence manuelle ;
- nombre de langues maternelles ;
- pratique de logiciels de modélisation antérieure aux enseignements ;
- nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant les enseignements ;
- pratique régulière de loisirs dans l'enfance et l'adolescence ;
- pratique régulière de loisirs à l'âge adulte ;
- niveau d'anglais ;
- enseignements de mécanique des solides (MSOL) ;
- enseignements de mathématiques appliquées (MAPP).

Les hypothèses MV23-MV25 concernent les variables intrinsèques à notre mesure :

- enseignements de prise en mains de CATIA (PCAT) ;
- enseignements d'analyse des mécanismes (AMEC) ;
- enseignements d'algorithmique (ALGO) ;
- recours à plus d'une stratégie ;
- nombre de stratégies ;
- combinaisons de stratégies ;
- capacité à changer de stratégies.

Nous vérifierons d'abord la normalité de la distribution des scores des tests spatiaux du deuxième recueil afin d'orienter le choix des tests statistiques pertinents pour éprouver nos hypothèses.

La synthèse des résultats de ces traitements statistiques se trouve paragraphe 21.4, p. 286.

21.1 Vérification de la normalité

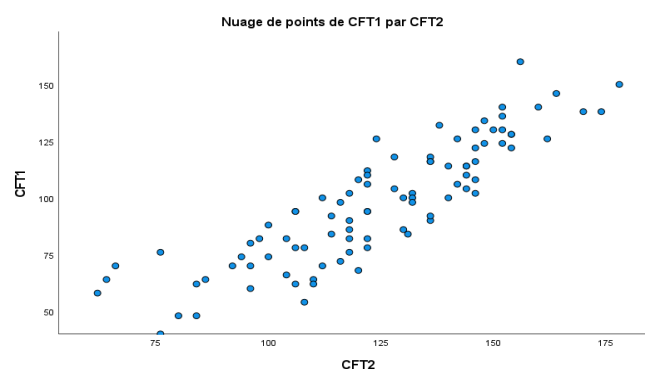
Les résultats du test de Shapiro-Wilk pour le PSVT:V2, le R PSVT:R2, le MRT2 et le MCT2 sont très significatifs, ce qui indique que leur distribution ne suit pas la loi normale. Le résultat pour les scores du CFT2 indique un résultat non significatif, ce qui indique que sa distribution suit la loi normale. L'ensemble de ces résultats et des statistiques descriptives est repris dans le tableau A32 en annexe. Compte tenu de ces résultats, nous allons utiliser les tests paramétriques pour les hypothèses relatives au CFT2 et non-paramétriques pour les hypothèses relatives au PSVT:V2, au R PSVT:R2, au MRT2 et au MCT2.

21.2 Hypothèse EHS1 : Les scores des tests spatiaux ont évolué entre les deux prises de données.

91 étudiants ont participé aux deux recueils du PSVT:V et 92 ont participé aux deux recueils du R PSVT:R, du MRT, du MCT et du CFT.

Nous vérifions qu'il n'y pas de valeur éloignée à écarter pour la distribution des scores grâce à un nuage de points, illustré dans la figure 72, (Kinnear et Gray, 2015, p. 164). Cette observation nous permet d'utiliser le test t pour échantillons appariés pour tester la différence entre les moyennes des deux recueils de performance aux CFT. Nous observons une évolution des scores qui n'annule cependant pas les différences initiales.

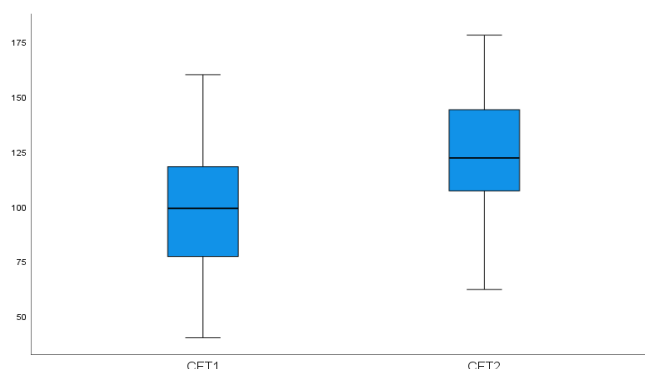
Figure 72. Diagramme de dispersion des scores du CFT1 par rapport à ceux du CFT2



Légende. CFT1 = scores du CFT pour le premier recueil ; CFT2 = scores du CFT pour le deuxième recueil. Ce diagramme illustre la dispersion des scores du CFT aux deux recueils.

Le test t pour échantillons appariés indique un résultat très significatif : $t(91) = 19,16$; $p < 0,001$. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle. La différence entre les moyennes est significative. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure 73, indique des scores plus élevés au deuxième recueil.

Figure 73. Évolution des scores du CFT



Légende. CFT1 = scores du CFT pour le premier recueil ; CFT2 = scores du CFT pour le deuxième recueil. Ce diagramme illustre la distribution des scores du CFT aux deux recueils. Les scores au second recueil sont plus élevés.

Nous utilisons un équivalent paramétrique pour les autres tests et choisissons le test du signe, qui, d'après Kinner et Gray (2015), est plus robuste que le test de Wilcoxon (p. 174). Les résultats du test du signe pour les quatre tests spatiaux sont regroupés dans le tableau 122.

Tableau 122. Résultats du test du signe pour le PSVT:V, le R PSVT:R, le MRT et le MCT

Test spatial	<i>N</i>	<i>p</i>
PSVT:V1 - PSVT:V2	90	< 0,001
R PSVT:R1 - R PSVT:R2	92	0,034
MRT1 - MRT2	92	< 0,001
MCT1 - MCT2	92	< 0,001

Légende. *N* = nombre d'étudiants, *p* = valeur de *p*.

Ce tableau indique les résultats du test du signe pour le PSVT:V, le R PSVT:R, le MRT et le MCT.

Tous les résultats sont significatifs : les scores ont évolué pour les quatre tests.

Le test indique du signe un résultat très significatif pour PSVT:V, le MRT et le MCT et un résultat significatif pour le R PSVT:R. L'hypothèse nulle est rejetée : il existe une différence significative entre les médianes des scores des deux prises de performance.

L'observation des boîtes à moustaches, illustrées figures A59-A62 en annexe, indique une augmentation des scores entre le premier et le deuxième recueil. La plus faible significativité du résultat pour le R PSVT:R s'explique par le fait que les scores étaient déjà élevés au premier recueil.

21.2.1 Effet d'entraînement

Le fait d'avoir passé deux fois les mêmes tests pourrait constituer un apprentissage et la progression des tests pourrait être due à l'effet d'entraînement (Hopkins, 1998, p. 139; Kinnear et Gray, 2015, p. 241). Selon Hopkins (1998), l'effet d'entraînement est plus important pour les tests limités dans le temps, la répétition de tests identiques plutôt que de versions parallèles d'un même test, pour les sujets d'habileté mentale élevée, pour les tests administrés en groupes plutôt qu'individuellement et pour les tests qui ne visent pas les compétences verbales (p. 140). L'auteur indique que l'effet d'entraînement diminue en fonction du temps entre les deux prises de données et que cet effet est faible pour un temps supérieur à trois mois pour les enfants : une partie de l'effet subsiste pour les adultes. Il précise que l'effet d'entraînement correspond à $0,2\sigma$ pour des sujets classiques. Sorby et Baartmans (2000, p. 304) et Onyancha *et al.* (2009, p. 165) utilisent cette évaluation de l'effet d'entraînement pour vérifier l'efficacité de leur dispositif pédagogique sur l'habileté spatiale de leurs étudiants. Ils calculent le gain moyen des étudiants qu'ils divisent par l'écart type. Si le résultat est supérieur à 0,2, ils concluent que l'amélioration des scores est due en partie à leur dispositif. Nous avons effectué le même calcul pour les scores des tests spatiaux : le détail se trouve dans le tableau 123.

Tableau 123. Étude de l'effet d'entraînement pour chacun des tests

Évolution des scores	N	Minimum	Maximum	Gain moyen	Écart-type	Gain moyen/Écart-type
PSVT:V	90	-4	15	2,52	3,349	0,75
R PSVT:R	92	-8	9	0,73	2,817	0,26
MRT	92	-9	10	2,86	3,094	0,92
MCT	92	-5	11	1,98	2,793	0,71
CFT	92	-4	54	26,23	13,128	2,00

Légende. N = nombre d'étudiants ayant participé aux deux recueils.

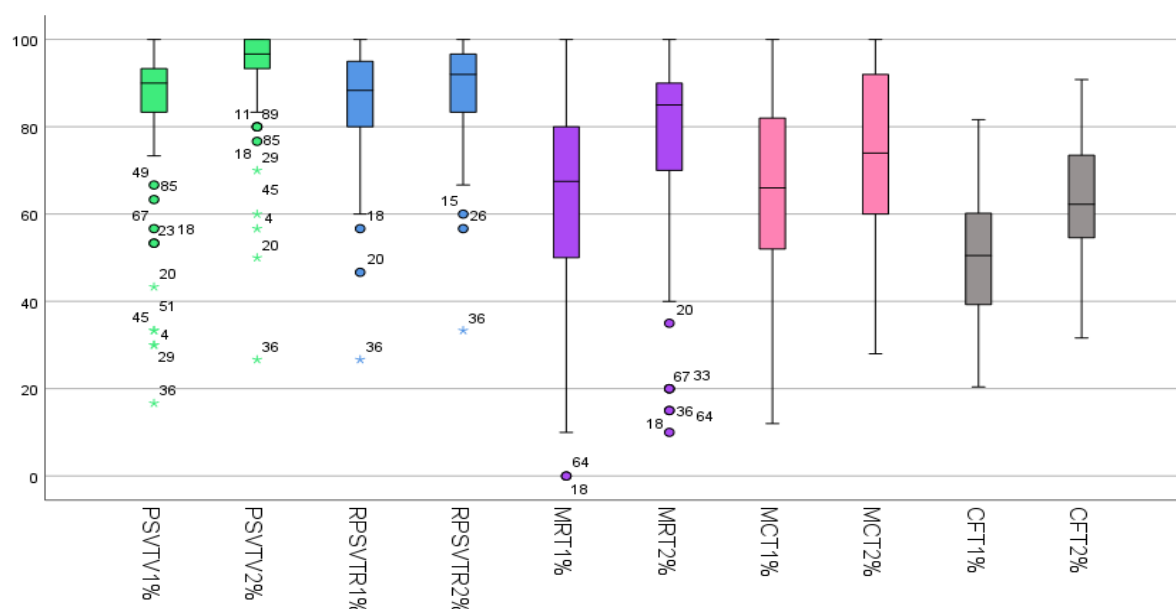
Ce tableau décrit les gains moyens, les écart-types et les rapports gains moyens/écart-types pour les tests spatiaux. Le rapport gain moyen/écart-type doit être supérieur à 0,2 pour que l'on considère que le gain moyen n'est pas seulement dû à l'effet d'entraînement.

Le rapport entre le gain moyen et l'écart-type étant supérieur à 0,2 pour tous les tests spatiaux, nous en concluons que la progression n'est pas seulement due à l'effet d'entraînement, même si le gain moyen du R PSVT:R est très proche de l'effet d'entraînement.

21.2.2 Caractérisation des évolutions

La conversion des scores en pourcentages permet de comparer les évolutions à partir des boîtes à moustaches réalisées à partir des scores convertis. Les boîtes sont illustrées figure 74.

Figure 74. Boîtes à moustaches des scores des tests spatiaux convertis en pourcentages au premier et au deuxième recueil



Légende. Les intitulés suivent la nomenclature TEST1% = scores du test au recueil 1 convertis en pourcentages et TEST2% = scores du test au recueil 2 convertis en pourcentages.

Ce diagramme illustre la distribution des scores des tests spatiaux exprimés en pourcentages aux deux recueils.

On observe une progression entre les deux recueils à tous les tests mais des décrochages pour trois tests : le PSVT:V, le R PSVT:R et le MRT. Les boîtes à moustaches confirment que la progression des scores du R PSVT:R est la plus faible.

21.2.3 Effet de la performance initiale

Nous souhaitons contrôler l'effet de la performance initiale des étudiants sur la performance finale. Pour cela, nous réalisons des analyses de régression linéaire pour déterminer si la performance au deuxième recueil, la variable dépendante, peut être prédite par la performance au premier recueil, la variable indépendante.

L'analyse des résidus permet de déterminer les observations pour lesquelles la différence entre la valeur réelle de la variable dépendante et sa valeur prédite par l'équation de régression sont cohérentes avec le reste des observations (Kinneer et Gray, 2015, p. 318). Nous écartons les observations éloignées pour garantir la qualité de la prédiction. Les résultats des analyses de régression pour les cinq tests sont regroupés dans le tableau 124.

Tableau 124. Analyses de régression linéaire pour les tests spatiaux aux deux recueils

Test spatial	<i>N</i>	Coefficient de régression	<i>b</i>	<i>ES</i>	<i>p</i>
PSVT:V	87	Constante	17,551	1,080	0,000
		Coefficient	0,412	0,041	0,000
R PSVT:R	91	Constante	10,321	1,665	0,000
		Coefficient	0,631	0,064	0,000
MRT	91	Constante	5,746	0,850	0,000
		Coefficient	0,781	0,064	0,000
MCT	91	Constante	5,998	0,812	0,000
		Coefficient	0,749	0,047	0,000
CFT	92	Constante	42,513	4,950	0,000
		Coefficient	0,834	0,049	0,000

Légende. *N* = nombre d'étudiants ; *b* = valeur estimée des coefficients de régression ; *ES* = erreur standard ; *p* = valeur de *p*.

Ce tableau décrit les coefficients de régression et leur significativité pour les scores spatiaux au premier et au second recueil.

Les régressions sont significatives pour tous les tests, cependant les progressions varient selon les tests. L'observation des boîtes à moustaches de la figure 74 permet de regrouper les tests de progression similaires. Les coefficients de régression sont les plus forts dans le dernier quart supérieur pour le MRT, le MCT et le CFT. On peut noter une forte influence du niveau de performance initial pour ces tests dont la progression maintient les niveaux de performance initiaux. Il y a une homogénéité du public qui progresse dans une proportion proche. En revanche, la progression aux PSVT:V et R PSVT:R n'est pas homogène. Tous les étudiants ont progressé mais les plus faibles restent décrochés.

21.3 Hypothèses EHS2-EHS18 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux caractéristiques individuelles.

Les étudiants ont été testés à deux reprises pour évaluer leur performance spatiale. Nous souhaitons voir si l'évolution, ou l'absence d'évolution, de leur performance peut être liée à des caractéristiques individuelles et/ou à la maîtrise des enseignements reçus au premier semestre de leurs études d'ingénieurs. Notre étude comporte des facteurs intra-sujets, i.e. les mesures répétées, et des facteurs inter-sujets, i.e. les caractéristiques individuelles et les scores de performance relatifs aux enseignements suivis. Les relations entre ces variables peuvent être

explorées à l'aide d'une ANOVA mixte dans laquelle les scores des deux recueils sont traités comme le facteur intra-sujet et les autres variables sont traitées comme des facteurs inter-sujets. Les plans factoriels permettent de relever les effets des facteurs considérés séparément et d'identifier d'éventuelles interactions entre les facteurs (Kinnear et Gray, 2015, p. 218). Le nombre de facteurs étant élevés, nous les regroupons selon leur nature lorsque nous effectuons les ANOVA dans le logiciel de statistiques SPSS : Kinnear et Gray (2015) recommandent de ne pas inclure plus de trois facteurs pour éviter l'interprétation d'interactions trop complexes (p. 233). Le nombre important de variables a un effet sur les effectifs de groupe ce qui rend difficile parfois l'utilisation des tests. Les catégories ainsi produites sont décrites dans le tableau 125.

Tableau 125. Catégories de variables regroupées pour les ANOVA relatives à l'évolution de l'habileté spatiale

Catégorie	Variable	Hypothèse
Sociodémographique	Genre, prévalence manuelle	EHS2, EHS3
Formation	Formation, pratique de logiciels de modélisation, nombre de logiciels de modélisation	EHS4, EHS5, EHS6
Langues	Nombre de langues maternelles, performance au TOEIC	EHS7, EHS8
Loisirs enfance et adolescence	Dynamiques, manipulateurs, 2D, C3D, artistiques	EHS9
Loisirs adulte	Dynamiques, manipulateurs, 2D, C3D, artistiques	EHS10
Enseignements à ISAE-Supméca	Performance en MSOL, MAPP, PCAT, AMEC, ALGO	EHS11, EHS12, EHS13, EHS14, EHS15
Stratégies de résolution	Nombre de stratégie, changement de stratégie, combinaisons de stratégies	EHS16, EHS17, EHS18

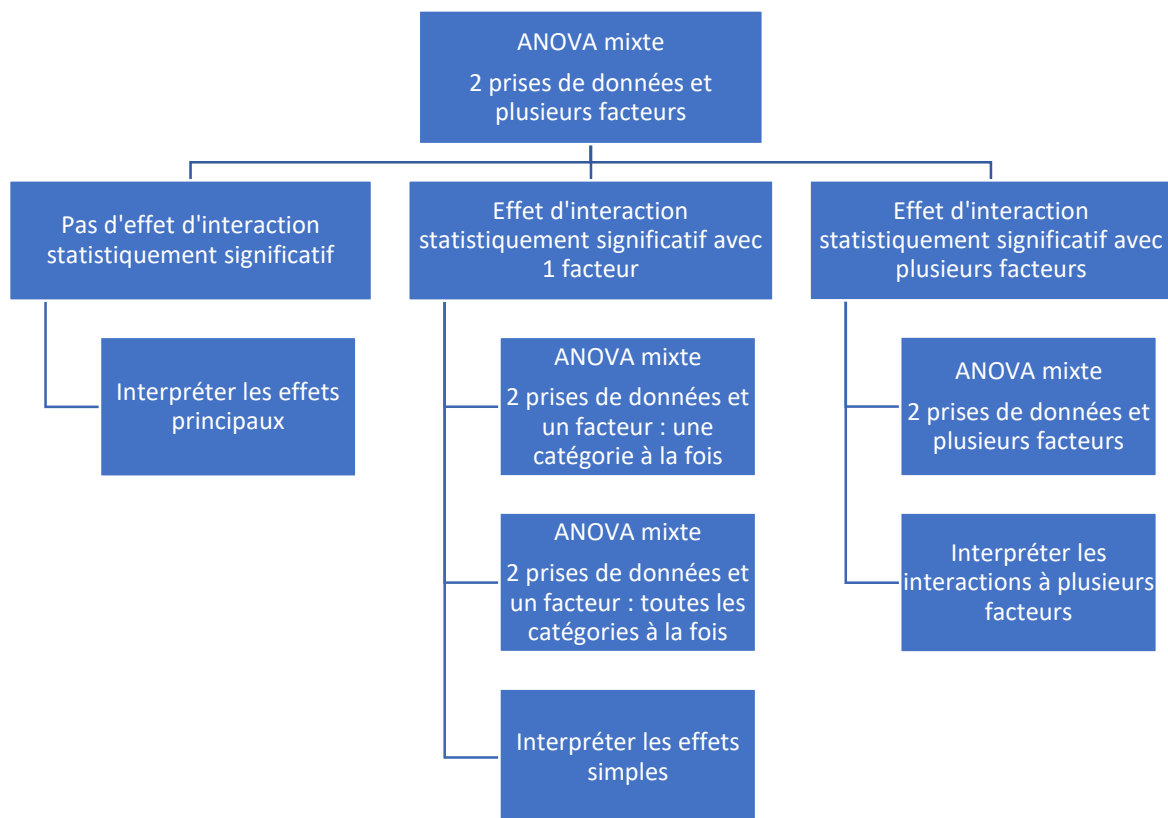
Note. Ce tableau décrit les regroupements de variables en fonction de leur nature et les hypothèses de recherche s'y rapportant.

À l'instar de Wagner-Egger et Nidegger (2015), nous allons considérer que notre ANOVA à mesures répétées à un facteur est une ANOVA mixte, soit une ANOVA à groupes indépendants à mesures répétées (p. 79) : les groupes indépendants concernent les catégories des facteurs inter-sujets (e.g. les hommes et les femmes du facteur genre) et les facteurs intra-sujets, i.e. les mesures répétées, la prise de performance en septembre et en décembre. Si des interactions significatives pour un facteur sont relevées (e.g. deux prises de données au MRT et genre), il conviendra de refaire des ANOVA à mesures répétées à un facteur pour chaque catégorie du facteur (e.g. deux prises de données au MRT et femmes, puis deux prises de données au MRT et hommes) pour tester les effets simples du facteur intra-sujet aux différentes catégories du facteur inter-sujet (IBM Support, 2020; Kinnear et Gray, 2015, p. 277; van den Berg, 2022b). Nous ne rapporterons que les effets intra-sujets des ANOVA à mesures répétées à un facteur, car dans ce cas il n'y a pas de facteur inter-sujet (Kinnear et Gray, 2015, p. 247; van den Berg, 2022b). Les résultats des effets significatifs des ANOVA à mesures répétées à un facteur pour chaque catégorie du facteur seront interprétés à l'aide des tracés des moyennes marginales estimées issus d'ANOVA à mesures répétées à un facteur comprenant tous les niveaux du facteur (e.g. deux prises de données au MRT et genre). Les interactions significatives avec plusieurs facteurs inter-sujets (e.g. deux prises de données au MRT, prévalence manuelle et

genre) seront traitées à travers la comparaison des moyennes marginales des catégories concernées du premier (M_1) et du second recueil (M_2), accompagnées des erreurs standard des deux recueils (ES_1 et ES_2). Notre méthodologie, illustrée dans la figure 75, sera appliquée à chaque hypothèse testée au travers d'une ANOVA mixte :

- si elle ne produit pas d'effet principal, alors nous interpréterons le résultat ;
- si elle produit un effet principal, alors nous vérifierons la présence d'effets simples ;
- si elle produit un effet principal avec interaction de plusieurs facteurs, alors nous interpréterons les moyennes marginales.

Figure 75. Méthodologie de traitement des ANOVA mixtes mettant en regard les évolutions de performance et les facteurs



Kinneer et Gray (2015) soulignent la faiblesse des expériences factorielles complexes auxquelles ils attribuent « un grand risque qu'une interaction ou l'autre soit significative seulement par le fruit du hasard » (p. 280). C'est pourquoi nous combinons ces ANOVA de manière à :

- établir la significativité des résultats pour chaque catégorie d'un facteur quand un effet principal apparaît ;
- s'appuyer sur une représentation graphique, i.e. les tracés des moyennes marginales, ou des données, i.e. les moyennes marginales, pour soutenir l'interprétation des résultats significatifs.

Il n'existe pas d'équivalent non-paramétrique à l'ANOVA mixte à notre connaissance. Bien que les distributions du PSVT:V, du R PSVT:R, du MRT et du MCT ne suivent pas la loi

normale, il est possible de réaliser des ANOVA quand le nombre de sujets de chaque catégorie est suffisamment élevé. Ce seuil varie selon la littérature. Il doit être supérieur à :

- 15 pour 2 à 9 catégories et à 20 pour 10 et 12 catégories selon Minitab (2022),
- 25 selon van der Berg (2022a),
- ou 30 selon Vaudor (2015).

Avant de réaliser les ANOVA mixtes, nous étudions les boîtes à moustaches de la performance aux tests spatiaux pour repérer les éventuelles mesures extrêmes. Il est plus prudent d'écarter ces valeurs parce qu'on ne peut garantir qu'elles représentent la véritable performance des étudiants et qu'il est préférable de se concentrer sur la masse des résultats dont la cohérence en termes d'écart-type est apparente dans les boîtes à moustaches (Kinneer et Gray, 2015, p. 220). Nous remarquons que certains tests spatiaux produisent plus de valeurs extrêmes que d'autres. En particulier le PSTV:V qui était placé en début de batterie. Il est possible que ce test ait servi de mise en activité des étudiants en raison de cette position. Il est aussi possible que la capacité qu'il vise à mobiliser, celle d'adopter un autre point de vue, soit inhabituelle pour les étudiants. Afin de ne pas écarter trop de données, nous éliminons les valeurs extrêmes communes à au moins deux des facteurs d'une catégorie.

De plus et afin de vérifier que les variances sont égales pour toutes nos catégories avant de réaliser nos ANOVA à mesures répétées, nous optons pour le test de Levene (1960) adapté aux distributions qui ne suivent pas la loi normale pour les hypothèses relatives au PSVT:V, au R PSVT:R, au MRT et au MCT (Glen, 2022b). Il doit être « non significatif ($p > 0,05$) pour que les variances puissent être supposées homogènes » (Kinneer et Gray, 2015, p. 172). Dans le logiciel SPSS, il teste l'homogénéité de la variance « pour chaque variable dépendante sur toutes les combinaisons de niveaux des facteurs inter-sujets, uniquement pour les facteurs inter-sujets » (IBM France, 2017, p. 8). En ce qui concerne les hypothèses relatives au CFT, dont les distributions suivent la loi normale, nous choisissons le test de Box (1949) qui teste « l'homogénéité des matrices covariantes des variables dépendantes sur toutes les combinaisons de niveaux des facteurs inter-sujets » (IBM France, 2017, p. 8). Il doit être non significatif pour respecter l'hypothèse nulle (Glen, 2022a). Le test de sphéricité de Mauchly (1940) quant à lui n'est pas applicable quand il n'y a que deux modalités du facteur intra-sujet (Wagner-Egger et Nidegger, 2015, p. 82), ici le score au test spatial que nous avons mesuré deux fois, i.e. avant et après les enseignements du premier semestre.

21.3.1 Hypothèses EHS2 et EHS3 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au genre et à la prévalence manuelle

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 126.

Tableau 126. Distribution corrigée des étudiants selon le genre et la prévalence manuelle pour les tests spatiaux

Variables sociodémographiques	PSVTV		RPSVTR		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
Femmes	18	21,2	19	20,9	19	20,7	19	20,7	19	20,7
Hommes	67	78,8	72	79,1	73	79,3	73	79,3	73	79,3
Total	85	100	91	100	92	100	92	100	92	100
Ambidextres	5	5,9	5	5,5	5	5,4	5	5,4	5	5,4
Droitiers	66	77,6	71	78,0	72	78,3	72	78,3	72	78,3
Gauchers	14	16,5	15	16,5	15	16,3	15	16,3	15	16,3
Total	85	100	91	100	92	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

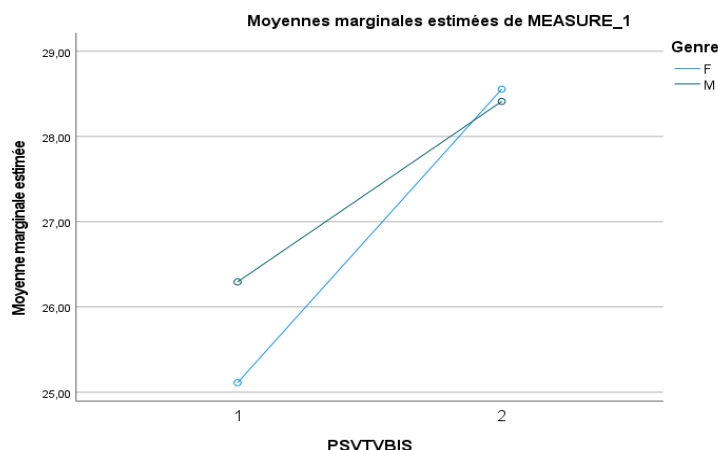
Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les facteurs genre et prévalence manuelle.

Nous allons présenter les résultats pour le genre, suivi de la prévalence, puis pour les interactions avec plusieurs facteurs.

21.3.1.1 Genre

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, la prévalence manuelle et le genre indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au PSVT:V et le genre : $F(1,79) = 4,63$; $p = 0,034$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple très significatif pour les hommes : $F(1,66) = 27,96$; $p = < 0,001$ et pour les femmes : $F(1,17) = 18,30$; $p = < 0,001$. L'observation des tracés des moyennes marginales estimées présentées dans la figure 76 indique que les femmes progressent d'avantage que les hommes et qu'elles les dépassent au second recueil en moyenne marginale. Cependant, la variabilité en regard des effectifs invite à la prudence ($N_F = 18$ [21%] femmes et $N_H = 67$ [79%] hommes).

Figure 76. Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V pour les femmes et les hommes



Légende. PSVTV1BIS 1 = scores du recueil 1 du PSVT:V ; PSVTV1BIS 2 = scores du recueil 2 du PSVT:V ; F = femmes ; M = hommes.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des femmes et des hommes.

La progression des femmes est plus importante que celle des hommes.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MRT, la prévalence manuelle et le genre indique un effet principal intra-sujet faiblement significatif pour l'évolution au MRT et le genre : $F(1,86) = 3,83$; $p = 0,054$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple très significatif pour les hommes : $F(1,72) = 48,02$; $p = < 0,001$ et pour les femmes : $F(1,18) = 221,96$; $p = < 0,001$. L'observation des boîtes à moustaches, présentées dans la figure A63 en annexe, semble indiquer que les femmes et les hommes progressent et que les femmes dépassent les hommes au second recueil mais que la distribution de leurs scores est plus étalée. De même que pour le PSVT:V, en raison du faible nombre de femmes, ce résultat faiblement significatif est à interpréter avec prudence.

En l'absence de résultats significatifs pour le R PSVT:R, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du genre sur l'évolution des scores de ces tests.

21.3.1.2 Prévalence manuelle

Nous n'observons pas de résultat significatif pour la prévalence manuelle en regard de l'évolution des scores spatiaux.

21.3.1.3 Genre et prévalence

Nous n'observons pas de résultat significatif pour l'interaction genre et prévalence manuelle en regard avec l'évolution des scores spatiaux.

21.3.2 Hypothèses EHS4, EHS5 et EHS6 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la formation antérieure, à la pratique antérieure de logiciels de modélisation et au nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 127.

Tableau 127. Distribution corrigée des étudiants selon la formation, à la pratique antérieure de logiciels de modélisation et au nombre de logiciels de modélisation pratiqués

Variables Formation	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
Avec technologie	46	54,8	52	57,1	53	57,6	53	57,6	53	57,6
Sans technologie	38	45,2	39	42,9	39	42,4	39	42,4	39	42,4
Total	84	100	91	100	92	100	92	100	92	100
Sans pratique de logiciels	12	14,3	12	13,2	12	13,0	12	13,0	12	13,0
Avec pratique de logiciels	72	85,7	79	86,8	80	87,0	80	87,0	80	87,0
Total	84	100	91	100	92	100	92	100	92	100
0 logiciel	12	14,3	12	13,2	12	13,0	12	13,0	12	13,0
1 logiciel	27	32,1	30	33,0	31	33,7	31	33,7	31	33,7
2 logiciels	39	46,4	42	46,2	42	45,7	42	45,7	42	45,7
3 logiciels	6	7,1	7	7,7	7	7,6	7	7,6	7	7,6
Total	84	100	91	100	92	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les facteurs formation, pratique antérieure de logiciels de modélisation et nombre de logiciels de modélisation pratiqués.

Plus de 80% de notre échantillon a déjà utilisé un logiciel de modélisation. Environ 55% des étudiants ont reçu des enseignements technologiques dans leur formation post-bac.

Dans la catégorie des variables relatives à la formation, les ANOVA mixtes sont réalisées en regroupant les facteurs formation et pratique de logiciels, puis les facteurs formation et nombre de logiciels, de manière à ne pas traiter les interactions pratique de logiciels et nombre de logiciels qui sont partiellement redondantes.

Nous allons présenter les résultats pour la formation antérieure, suivi de la pratique de logiciel, puis pour le nombre de logiciels pratiqués, et finalement les interactions avec plusieurs facteurs.

21.3.2.1 Formation antérieure

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MRT, la pratique de logiciels et les catégories de formation antérieure indique un effet principal inter-sujet significatif pour l'évolution au MRT et la formation antérieure : $F(1,88) = 4,72$; $p = 0,032$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur confirment un effet simple très significatif pour les étudiants sans bagage technologique : $F(1,38) = 62,01$; $p = < 0,001$ et pour les étudiants avec bagage technologique : $F(1,52) = 28,26$; $p = < 0,001$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A64 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les étudiants n'ayant pas reçu d'enseignements technologiques durant leur formation post-bac, dont la performance en moyenne marginale était supérieure au premier recueil. Les écarts de performance entre les deux catégories d'étudiants sont creusés.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V, le R PSVT:R, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de la formation sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.2.2 *Pratique antérieure de logiciels de modélisation*

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au R PSVT:R, la formation et la pratique antérieure de logiciels de modélisation indique un effet principal inter-sujet significatif pour l'évolution au R PSVT:R et la pratique de logiciels : $F(1,87) = 4,04$; $p = 0,047$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple non significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation : $F(1,11) = 3,42$; $p = 0,092$ et très faiblement significatif pour les étudiants avec pratique de logiciels de modélisation : $F(1,78) = 3,66$; $p = 0,059$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A65 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour la catégorie des étudiants n'ayant jamais pratiqué de logiciel de modélisation. Les écarts restent néanmoins maintenus.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MCT, la formation et la pratique antérieure de logiciels de modélisation indique un effet principal inter-sujet très significatif pour l'évolution au MCT et la pratique antérieure de logiciels de modélisation : $F(1,88) = 4,04$; $p = 0,004$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation : $F(1,11) = 9,05$; $p = 0,012$ et très significatif pour les étudiants avec pratique de logiciels de modélisation : $F(1,79) = 37,06$; $p < 0,001$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A66 en annexe, semble indiquer une progression légèrement plus importante pour la catégorie des étudiants n'ayant jamais pratiqué de logiciel de modélisation. Les écarts restent néanmoins maintenus.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au CFT, la formation et la pratique antérieure de logiciels de modélisation indique un effet principal inter-sujet significatif pour l'évolution au CFT et la pratique antérieure de logiciels de modélisation : $F(1,88) = 5,07$; $p = 0,027$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple très significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation : $F(1,11) = 48,18$; $p < 0,001$, et pour les étudiants avec pratique de logiciels de modélisation : $F(1,78) = 315,08$; $p < 0,001$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A67 en annexe, semble indiquer une progression similaire pour les deux catégories. Les écarts restent maintenus.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V et le MRT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.2.3 *Nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca*

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MCT, la formation et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca indique un effet principal inter-sujet significatif pour l'évolution au MCT et le nombre de logiciels de modélisation : $F(3,85) = 3,32$; $p = 0,024$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation : $F(1,11) = 9,05$; $p = 0,012$, très significatif pour les étudiants ayant pratiqué un logiciel de modélisation : $F(1,30) = 12,22$; $p = 0,001$ et très significatif pour les étudiants ayant pratiqué deux logiciels de modélisation : $F(1,30) = 30,79$; $p < 0,001$. Le résultat pour les étudiants ayant pratiqué trois logiciels de modélisation n'est pas significatif : $F(1,6) = 0,02$; $p = 0,905$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A68 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de

modélisation et ceux en ayant pratiqué deux. Les étudiants ayant pratiqué trois logiciels semblent avoir stagné ce qui peut s'expliquer par leur niveau de performance élevé dès le premier recueil, la marge de progression étant plus faible. Les étudiants sans pratique initiale restent les plus faibles, alors que les étudiants ayant pratiqué deux logiciels se rapprochent de ceux en ayant pratiqué trois.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V, le R PSVT:R, le MRT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.3 Hypothèses EHS7 et EHS8 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles et au score de TOEIC

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 128.

Tableau 128. Distribution corrigée des étudiants selon le nombre de langues maternelles et le niveau d'anglais pour les tests spatiaux

Variables Langues	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1 langue maternelle	75	87,2	80	88,9	80	87,9	80	87,9	80	87,9
2 langues maternelles	11	12,8	10	11,1	11	12,1	11	12,1	11	12,1
Total	86	100	90	100	91	100	91	100	91	100
Groupe TOEIC 1	23	26,7	25	27,8	25	27,5	25	27,5	25	27,5
Groupe TOEIC 2	37	43,0	40	44,4	40	44,0	40	44,0	40	44,0
Groupe TOEIC 3	26	30,2	25	27,8	26	28,6	26	28,6	26	28,6
Total	86	100	90	100	91	100	91	100	91	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets ; TOEIC 1 = scores élevés ; TOEIC 2 = scores modérés ; TOEIC 3 = scores faibles.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les facteurs nombre de langues maternelles et niveau d'anglais.

Nous allons présenter les résultats pour le nombre de langues maternelles apprises, suivi du niveau d'anglais, puis les éventuelles interactions avec plusieurs facteurs.

21.3.3.1 Nombre de langues maternelles apprises

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, les catégories de scores de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises indique un effet principal inter-sujet très significatif pour l'évolution au PSVT:V et le nombre de langues maternelles apprises : $F(1,80) = 12,23$; $p = 0,001$. Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,034$) et au second recueil ($p < 0,001$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif très significatif pour les étudiants ayant appris une langue maternelle : $F(1,74) = 42,58$; $p < 0,001$ et pour les étudiants ayant appris deux langues maternelles : $F(1,10) = 13,16$; $p = 0,005$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A69 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les étudiants ayant appris deux langues maternelles. Malgré cette progression, les étudiants ayant appris une langue

maternelle maintiennent une performance supérieure. Ce résultat est à prendre avec prudence en raison du faible effectif de la catégorie deux langues maternelles ($n = 11$).

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au R PSVT:R, les catégories de scores de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au R PSVT:R et le nombre de langues maternelles apprises : $F(1,84) = 5,22$; $p = 0,025$; ainsi qu'un effet principal inter-sujet très significatif : $F(1,84) = 7,25$; $p = 0,009$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple très significatif pour les étudiants ayant appris une langue maternelle : $F(1,79) = 9,66$; $p = 0,003$ et non significatif pour les étudiants ayant appris deux langues maternelles : $F(1,9) = 0,70$; $p = 0,423$. L'observation de l'évolution des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A70 en annexe, semble indiquer que les étudiants ayant appris une langue maternelle ont progressé.

En l'absence de résultats significatifs pour le MRT, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du nombre de langues maternelles sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.3.2 TOEIC

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, le nombre de langues maternelles apprises et les catégories de niveau d'anglais indique un effet principal inter-sujet très significatif pour l'évolution au PSVT:V et les catégories de niveau d'anglais : $F(2,80) = 8,12$; $p = 0,001$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple très significatif pour les étudiants de la catégorie des scores de TOEIC élevés : $F(1,22) = 20,78$; $p < 0,001$, pour les étudiants de la catégorie des scores de TOEIC modérés : $F(1,37) = 19,32$; $p < 0,001$ et pour les étudiants de la catégorie des scores de TOEIC faibles : $F(1,25) = 17,51$; $p < 0,001$. L'observation des évolutions des moyennes marginales, illustrées dans la figure A71 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les catégories d'étudiants dont les scores de TOEIC sont moyens et faibles. Les étudiants des groupes à scores élevés et moyens maintiennent une performance supérieure.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au R PSVT:R, le nombre de langues maternelles apprises et les catégories de niveau d'anglais indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au R PSVT:R et les catégories de niveau d'anglais : $F(2,84) = 3,87$; $p = 0,025$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple non significatif pour les étudiants de la catégorie des scores de TOEIC élevés : $F(1,24) = 0,005$; $p = 0,945$, significatif pour les étudiants aux scores de TOEIC modérés : $F(1,40) = 5,94$; $p = 0,019$ et non significatif pour les étudiants aux scores de TOEIC faibles : $F(1,24) = 2,30$; $p = 0,143$. L'observation des évolutions des moyennes marginales, illustrées dans la figure A72 en annexe, semble indiquer une progression de la catégorie des étudiants aux scores de TOEIC modérés.

En l'absence de résultats significatifs pour le MRT, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal les catégories de niveau d'anglais sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.3.3 Nombre de langues maternelles et TOEIC

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, le nombre de langues maternelles et les catégories de niveau d'anglais indique un effet d'interaction inter-sujet significatif entre le groupe de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises : $F(2,80) = 3,95$; $p = 0,023$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction nombre de langues et TOEIC, décrites dans le tableau 129, révèle que tous les groupes progressent. La progression au PSVT:V la plus forte concerne les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant les plus faibles scores en anglais ($M_1 = 17,40$, $ES_1 = 1,79$; $M_2 = 21,60$, $ES_2 = 1,20$) et les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant les scores modérés en anglais ($M_1 = 23,33$, $ES_1 = 2,31$; $M_2 = 27,33$, $ES_2 = 1,55$), soit les étudiants aux scores de PSVT:V les plus faibles aux deux recueils.

Tableau 129. Moyennes marginales estimées pour les interactions Nombre de langues maternelles et scores de TOEIC et performance au PSVT:V

Nombre de langues maternelles	Groupe TOEIC	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	27,800	0,896	26,017	29,583
		2	29,250	0,602	28,052	30,448
	2	1	26,147	0,687	24,779	27,515
		2	28,500	0,462	27,581	29,419
	3	1	25,476	0,874	23,736	27,216
		2	28,190	0,588	27,021	29,360
2	1	1	26,000	2,314	21,396	30,604
		2	28,333	1,555	25,240	31,427
	2	1	23,333	2,314	18,729	27,937
		2	27,333	1,555	24,240	30,427
	3	1	17,400	1,792	13,834	20,966
		2	21,600	1,204	19,204	23,996

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au R PSVT:R, le nombre de langues maternelles et les catégories de niveau d'anglais indique un faible effet principal intra-sujet faiblement significatif entre l'évolution au R PSVT:R, le groupe de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises : $F(2,84) = 3,09$; $p = 0,051$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction nombre de langues et TOEIC, décrites dans le tableau A32 en annexe, révèle tous les groupes progressent, à l'exception des étudiants ayant appris deux langues maternelles et aux scores de TOEIC élevés qui régressent ($M_1 = 26,33$, $ES_1 = 1,88$; $M_2 = 21,67$, $ES_2 = 1,60$). Cela concerne cependant un très faible effectif ($n = 4$; 4 %). La progression au R PSVT:R la plus forte concerne les étudiants ayant appris une langue maternelle et obtenant des scores modérés en anglais ($M_1 = 25,68$, $ES_1 = 0,53$; $M_2 = 26,73$, $ES_2 = 0,46$) et les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant les scores les plus faibles en anglais ($M_1 = 23,25$, $ES_1 = 1,63$; $M_2 = 24,25$, $ES_2 = 1,39$).

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au CFT, le nombre de langues maternelles et les catégories de niveau d'anglais indique un faible effet principal inter-sujet significatif entre l'évolution au CFT, le groupe de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises : $F(2,85) = 3,26$; $p = 0,043$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction nombre de langues et groupes de niveau de TOEIC, décrites dans le tableau A33 en annexe, révèle que tous les groupes progressent. La progression au CFT la plus forte concerne les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant des scores élevés en anglais ($M_1 = 74,67$, $ES_1 = 14,98$; $M_2 = 105,33$, $ES_2 = 14,24$), les étudiants ayant appris une langue maternelle et obtenant des scores modérés en anglais ($M_1 = 93,68$, $ES_1 = 4,26$; $M_2 = 121,11$, $ES_2 = 4,06$) et les étudiants ayant appris une langue maternelle et obtenant des scores élevés en anglais ($M_1 = 109,00$, $ES_1 = 5,53$; $M_2 = 136,18$, $ES_2 = 6,26$). La plus forte progression semble être réalisée par les étudiants dont les scores étaient les plus faibles à la première prise de données, cette progression ne leur permettant cependant pas de rattraper leurs pairs. Cela concerne cependant un très faible effectif ($n = 3$; 3 %), il faut donc être prudent avec ce résultat.

21.3.4 Hypothèse EHS9 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus selon les catégories de loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans les tableaux 130-134.

Tableau 130. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs dynamique pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour les tests spatiaux

Catégories dynamiques	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
DEPP0A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
DEPP0H	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
DEPP0K	10	12,0	12	13,2	12	13,6	12	13,2	12	13,0
DEPP0L	2	2,4	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
DEPP0N	4	4,8	4	4,4	5	5,7	4	4,4	5	5,4
DEPP0O	3	3,6	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
DEPP1A	2	2,4	2	2,2	2	2,3	2	2,2	2	2,2
DEPP1B	22	26,5	23	25,3	22	25,0	23	25,3	23	25,0
DEPP1C	9	10,8	9	9,9	9	10,2	9	9,9	9	9,8
DEPP1E	2	2,4	2	2,2	2	2,3	2	2,2	2	2,2
DEPP1F	3	3,6	4	4,4	3	3,4	4	4,4	4	4,3
DEPP2B	7	8,4	8	8,8	7	8,0	8	8,8	8	8,7
DEPP2C	12	14,5	14	15,4	13	14,8	14	15,4	14	15,2
DEPP2E	2	2,4	2	2,2	2	2,3	2	2,2	2	2,2
DEPP2F	3	3,6	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
Total	83	100	91	100	88	100	91	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs dynamiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau 131. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour les tests spatiaux

Catégories manipulatoires	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
MR0A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR0K	8	9,6	9	9,9	10	11,4	9	9,9	10	10,9
MR0L	6	7,2	8	8,8	8	9,1	8	8,8	8	8,7
MR0M	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR0N	5	6,0	5	5,5	5	5,7	5	5,5	5	5,4
MR0O	2	2,4	2	2,2	2	2,3	2	2,2	2	2,2
MR1A	2	2,4	2	2,2	2	2,3	2	2,2	2	2,2
MR1B	11	13,3	11	12,1	10	11,4	11	12,1	11	12,0
MR1C	3	3,6	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
MR1D	3	3,6	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
MR1E	8	9,6	9	9,9	9	10,2	9	9,9	9	9,8
MR1F	3	3,6	3	3,3	3	3,4	3	3,3	3	3,3
MR2A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR2B	14	16,9	16	17,6	14	15,9	16	17,6	16	17,4
MR2C	6	7,2	7	7,7	7	8,0	7	7,7	7	7,6
MR2E	0	0,0	6	6,6	5	5,7	6	6,6	6	6,5
MR2F	0	0,0	4	4,4	4	4,5	4	4,4	4	4,3
Total	83	100	91	100	88	100	91	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau 132. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour les tests spatiaux

Catégories 2D	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
2D0A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
2D0B	13	15,7	14	15,4	14	15,9	14	15,4	15	16,3
2D0C	12	14,5	13	14,3	13	14,8	13	14,3	13	14,1
2D1B	14	16,9	15	16,5	15	17,0	15	16,5	15	16,3
2D1C	29	34,9	33	36,3	30	34,1	33	36,3	33	35,9
2D2B	0	0,0	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
2D2C	14	16,9	14	15,4	14	15,9	14	15,4	14	15,2
Total	83	100	91	100	88	100	91	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau 133. Distribution des étudiants selon les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour les tests spatiaux

Catégories C3D	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
C3D0A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
C3D0B	8	9,6	8	8,8	8	9,1	8	8,8	9	9,8
C3D0C	5	6,0	6	6,6	6	6,8	6	6,6	6	6,5
C3D1B	24	28,9	26	28,6	26	29,5	26	28,6	26	28,3
C3D1C	20	24,1	24	26,4	23	26,1	24	26,4	24	26,1
C3D2B	4	4,8	4	4,4	4	4,5	4	4,4	4	4,3
C3D2C	21	25,3	22	24,2	20	22,7	22	24,2	22	23,9
Total	83	100	91	100	88	100	91	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs de construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau 134. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence pour les tests spatiaux

Catégories artistiques	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
ART0A	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
ART0B	10	12,0	10	11,0	11	12,5	10	11,0	11	12,0
ART0C	9	10,8	10	11,0	9	10,2	10	11,0	10	10,9
ART1B	19	22,9	21	23,1	20	22,7	21	23,1	21	22,8
ART1C	14	16,9	16	17,6	15	17,0	16	17,6	16	17,4
ART2B	9	10,8	10	11,0	10	11,4	10	11,0	10	10,9
ART2C	21	25,3	23	25,3	22	25,0	23	25,3	23	25,0
Total	83	100	91	100	88	100	91	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivi des loisirs manipulateurs, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D, des loisirs artistiques et les éventuelles interactions avec plusieurs facteurs.

Pour permettre une meilleure lisibilité des tracés des moyennes marginales, les graphiques ne contiennent que les catégories pour lesquelles un résultat significatif a été constaté.

21.3.4.1 Loisirs dynamiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs dynamiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance à ces tests en l'absence de résultats significatifs.

21.3.4.2 Loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MCT et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au MCT et les catégories de loisirs manipulatoires : $F(10,14) = 2,62$; $p = 0,049$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif pour les catégories MR0K ($n = 9$), MR1B ($n = 11$), MR1F ($n = 3$), MR2B ($n = 16$) et MR2E ($n = 6$). L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 135.

Tableau 135. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution au MCT et loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Catégorie	ddl 1	ddl 2	F	p
MR0K	1	8	43,62	< 0,001
MR0L	1	7	2,62	0,150
MR0N	1	4	0,030	0,871
MR1A	1	1	1,00	0,500
MR1B	1	10	21,53	< 0,001
MR1C	1	2	0,158	0,729
MR1D	1	2	1,71	0,321
MR1E	1	8	2,65	0,142
MR1F	1	2	25,00	0,038
MR2B	1	15	4,55	0,050
MR2C	1	6	1,00	0,356
MR2E	1	5	9,31	0,028
MR2F	1	3	8,87	0,059

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation des évolutions des moyennes marginales, illustrées dans la figure A73 en annexe, semble indiquer que toutes ces catégories progressent au MCT. La plus forte progression concerne la catégorie MR0K, soit les étudiants à pratique de loisirs manipulatoires faible et autres loisirs modérée.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MRT et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au MRT et les catégories de loisirs manipulatoires : $F(10,14) = 2,71$; $p = 0,043$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif pour les catégories MR0K ($n = 10$), MR1B ($n = 10$), MR1E ($n = 9$), MR2B ($n = 14$) et MR2C ($n = 7$). L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 136.

Tableau 136. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution au MRT et loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Catégorie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
MR0K	1	9	30,20	< 0,001
MR0L	1	7	5,00	0,060
MR0N	1	4	5,83	0,073
MR0O	1	1	5,44	0,258
MR1A	1	1	1,00	0,500
MR1B	1	9	13,09	0,006
MR1C	1	2	1,31	0,371
MR1D	1	2	9,00	0,095
MR1E	1	8	5,82	0,042
MR1F	1	2	9,14	0,094
MR2B	1	13	10,58	0,006
MR2C	1	6	53,56	< 0,001
MR2E	1	4	0,296	0,616
MR2F	1	3	2,69	0,200

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de F ; *p* = valeur de p.

L'observation des évolutions des moyennes marginales, illustrées dans la figure A74 en annexe, semble indiquer que toutes ces catégories progressent au MRT. La plus forte progression concerne la catégorie MR2C, soit les étudiants à pratique de loisirs manipulatoires et autres loisirs forte.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au CFT et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence indique un effet principal inter-sujet faiblement significatif pour l'évolution au CFT et les catégories de loisirs manipulatoires : $F(10,15) = 2,52$; $p = 0,051$. Les ANOVA à mesures répétées à un facteur indiquent un effet simple significatif pour les catégories MR0K ($n = 10$), MR0L ($n = 8$), MR0N ($n = 5$), MR1A ($n = 2$), MR1B ($n = 11$), MR1C ($n = 3$), MR1E ($n = 9$), MR1F ($n = 3$), MR2B ($n = 16$), MR2C ($n = 7$), MR2E ($n = 5$) et MR2F ($n = 4$). L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 137.

Tableau 137. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution au CFT et loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Catégorie	ddl 1	ddl 2	F	p
MR0K	1	9	23,44	0,001
MR0L	1	7	29,63	0,001
MR0N	1	4	60,44	0,001
MR0O	1	1	81,00	0,070
MR1A	1	1	441,00	0,030
MR1B	1	10	35,70	0,000
MR1C	1	2	21,28	0,044
MR1D	1	2	1,74	0,317
MR1E	1	8	27,56	0,001
MR1F	1	2	34,31	0,028
MR2B	1	15	65,84	0,000
MR2C	1	6	83,54	0,000
MR2E	1	5	19,37	0,007
MR2F	1	3	136,11	0,001

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation des évolutions des moyennes marginales, illustrées dans la figure A75 en annexe, semble indiquer que toutes ces catégories progressent au CFT. La plus forte progression concerne la catégorie MR1A, soit les étudiants à pratique de loisirs manipulatoires modérée et sans pratique d'autres loisirs. Certaines catégories, e.g. MR1A et MR2C, rattrapent d'autres catégories après leurs progressions.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V et le R PSVT:R, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.4.3 Loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MRT et les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au MRT et les catégories de loisirs 2D : $F(3,14) = 3,84$; $p = 0,034$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple intra-sujet très significatif pour les catégories 2D0B ($n = 14$), 2D1B ($n = 15$) et 2D1C ($n = 31$). L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 138.

Tableau 138. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du MRT et les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Catégorie	ddl 1	ddl 2	F	p
2D0B	1	13	12,56	0,004
2D0C	1	12	3,70	0,079
2D1B	1	14	52,74	< 0,001
2D1C	1	29	57,33	< 0,001
2D2C	1	13	3,77	0,074

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation des tracés des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A76 en annexe, semble indiquer une forte progression pour ces trois catégories, moins marquée pour la catégorie 2D0B. Ces catégories ont une pratique nulle (2D0B) et modérée (2D1B et 2D1C) des loisirs 2D et modérée (2D0B et 2D1B) et forte (2D1C) des autres loisirs. Ce sont d'autre part, des catégories dont les performances étaient parmi les plus faibles au premier recueil.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V, le R PSVT:R, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.4.4 Loisirs de construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

En l'absence de résultats significatifs pour les tests spatiaux, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs de construction 3D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.4.5 Loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

En l'absence de résultats significatifs pour les tests spatiaux, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.4.6 Interactions avec plusieurs facteurs des loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Nous obtenons quelques effets principaux significatifs pour l'interaction entre plusieurs catégories de loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et l'évolution de la performance au PSVT:V. Nous constatons notamment un effet d'interaction significatif inter-sujet entre la pratique de loisirs de construction 3D et la pratique de loisirs artistiques dans l'enfance et l'adolescence pour la performance au PSVT:V : $F(1,13) = 4,87$; $p = 0,046$. Après avoir isolé le sujet 25 de la catégorie 0A, nous obtenons le même résultat : $F(1,13) = 4,87$; $p = 0,046$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction loisirs de construction 3D et loisirs artistiques, décrites dans le tableau A34 en annexe, révèle que la différence de performance au PSVT:V est plus forte entre les étudiants à la fois dans la catégorie C3D2C et la catégorie ART0C ($n = 1$, $M = 21,50$, $ES = 1,28$) et les étudiants à la fois dans la catégorie C3D1C et la catégorie ART1B ($n = 2$, $M = 30,00$, $ES = 1,87$).

Les très faibles effectifs des catégories, dus au croisement de plusieurs catégories dont les effectifs sont parfois très faibles, nous invite à ne pas traiter les interactions à plusieurs facteurs dont les résultats sont significatifs pour la pratique des loisirs, aussi bien pour la temporalité enfance et adolescence que pour la temporalité âge adulte.

21.3.5 Hypothèse EHS10 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiqués à l'âge adulte

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans les tableaux 139-143.

Tableau 139. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs dynamique pratiqués à l'âge adulte pour les tests spatiaux

Catégories dynamiques	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
DEPP20B	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
DEPP20E	7	8,2	8	8,9	8	8,8	8	8,7	8	8,7
DEPP20F	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
DEPP20J	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
DEPP20K	25	29,4	28	31,1	28	30,8	28	30,4	28	30,4
DEPP20N	6	7,1	6	6,7	7	7,7	7	7,6	7	7,6
DEPP21A	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
DEPP21B	29	34,1	30	33,3	30	33,0	31	33,7	31	33,7
DEPP21C	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
DEPP21E	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
DEPP22B	7	8,2	7	7,8	7	7,7	7	7,6	7	7,6
DEPP22F	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
Total	85	100	90	100	91	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte.

Tableau 140. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte pour les tests spatiaux

Catégories manipulateurs	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
MR20B	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR20J	8	9,4	8	8,9	8	8,8	8	8,7	8	8,7
MR20K	21	24,7	23	25,6	24	26,4	24	26,1	24	26,1
MR20L	2	2,4	3	3,3	3	3,3	3	3,3	3	3,3
MR20M	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR20N	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
MR20O	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR21A	9	10,6	9	10,0	9	9,9	9	9,8	9	9,8
MR21B	29	34,1	31	34,4	31	34,1	32	34,8	32	34,8
MR21C	8	9,4	8	8,9	8	8,8	8	8,7	8	8,7
MR22C	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR22E	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
MR22F	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
Total	85	100	90	100	91	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte.

Tableau 141. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte pour les tests spatiaux

Catégories 2D	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
2D20B	43	50,6	47	52,2	46	50,5	47	51,1	47	51,1
2D20C	11	12,9	11	12,2	12	13,2	12	13,0	12	13,0
2D21B	12	14,1	14	15,6	14	15,4	14	15,2	14	15,2
2D21C	15	17,6	14	15,6	15	16,5	15	16,3	15	16,3
2D22B	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
2D22C	3	3,5	3	3,3	3	3,3	3	3,3	3	3,3
Total	85	100	90	100	91	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte.

Tableau 142. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs de construction 3D (C3D) pratiqués à l'âge adulte pour les tests spatiaux

Catégories C3D	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
C3D20B	64	75,3	69	76,7	70	76,9	70	76,1	70	76,1
C3D20C	12	14,1	11	12,2	12	13,2	12	13,0	12	13,0
C3D21B	5	5,9	6	6,7	5	5,5	6	6,5	6	6,5
C3D21C	3	3,5	3	3,3	3	3,3	3	3,3	3	3,3
C3D22C	1	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1	1,1
Total	85	100	90	100	91	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte.

Tableau 143. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte pour les tests spatiaux

Catégories artistiques	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
ART20B	31	36,5	33	36,7	33	36,3	34	37,0	34	37,0
ART20C	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
ART21B	42	49,4	45	50,0	46	50,5	46	50,0	46	50,0
ART21C	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
ART22B	6	7,1	6	6,7	6	6,6	6	6,5	6	6,5
ART22C	2	2,4	2	2,2	2	2,2	2	2,2	2	2,2
Total	85	100	90	100	91	100	92	100	92	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte.

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivi des loisirs manipulatoires, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

Pour permettre une meilleure lisibilité des tracés des moyennes marginales, les graphiques ne contiennent que les catégories pour lesquelles un résultat significatif a été constaté.

21.3.5.1 Loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V et catégories des loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte indique un effet principal intra-sujet très significatif pour l'évolution au PSVT:V et les catégories de loisirs dynamiques : $F(7,30) = 4,21$; $p = 0,002$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple significatif pour les catégories DEPP20E ($n = 7$), DEPP20K ($n = 25$) et DEPP21B ($n = 29$). Ces catégories concernent des étudiants à faible pratique dynamique et pratique d'autres loisirs modérée (DEPP20E et DEPP20K) et à pratique dynamique et pratique d'autres loisirs modérées (DEPP21B). L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 144.

Tableau 144. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du PSVT:V et les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte

Catégorie	ddl 1	ddl 2	F	p
DEPP20E	1	6	9,35	0,022
DEPP20J	1	1	13,44	0,170
DEPP20K	1	24	15,47	< 0,001
DEPP20N	1	5	0,25	0,638
DEPP21A	1	1	0,11	0,795
DEPP21B	1	28	32,91	< 0,001
DEPP21C	1	1	1,00	0,500
DEPP22B	1	6	2,51	0,164

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation des tracés des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A77 en annexe, semble indiquer une progression modérée pour ces catégories.

En l'absence de résultats significatifs pour le R PSVT:R, le MRT, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.5.2 Loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au R PSVT:R et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au R PSVT:R et les catégories de loisirs manipulatoires : $F(5,34) = 3,28$; $p = 0,016$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur n'indique d'effet simple significatif pour aucune des catégories. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 145.

Tableau 145. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du R PSVT:R et les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte

Catégorie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
MR20J	1	7	0,42	0,539
MR20K	1	22	0,22	0,642
MR20L	1	2	6,92	0,119
MR20N	1	1	9,00	0,205
MR21A	1	8	0,60	0,461
MR21B	1	30	0,67	0,418
MR21C	1	7	0,70	0,430

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de *F* ; *p* = valeur de *p*.

L'observation des tracés des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A78 en annexe, semble indiquer une progression plus prononcée pour les catégories MR20L ($n = 3$), MR22C ($n = 1$), MR20O ($n = 0$) et MR22E ($n = 1$). Les faibles effectifs de ces catégories rendent l'interprétation de ce résultat difficile.

En l'absence de résultats significatifs pour le PSVT:V, le MRT, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre évidence d'effet principal des catégories de loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.5.3 Loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte

Nous ne pouvons pas mettre évidence d'effet principal des loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance aux tests spatiaux en l'absence de résultats significatifs.

21.3.5.4 Loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V et les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au PSVT:V et les catégories de loisirs de construction 3D : $F(3,30) = 3,46$; $p = 0,028$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple significatif pour la catégorie C3D20B ($n = 64$) : $F(1,63) = 43,96$; $p < 0,001$. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 146.

Tableau 146. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du PSVT:V et les catégories de loisirs de construction pratiqués à l'âge adulte

Catégorie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
C3D20B	1	63	43,96	< 0,001
C3D20C	1	11	0,90	0,362
C3D21B	1	4	5,90	0,072
C3D21C	1	2	2,77	0,238

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de *F* ; *p* = valeur de *p*.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A79 en annexe, semble indiquer une progression pour cette catégorie, c'est-à-dire les étudiants sans pratique de loisirs de construction et avec une pratique modérée d'autres loisirs.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au MCT et les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au MCT et les catégories de loisirs de construction 3D : $F(3,35) = 3,85$; $p = 0,017$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple significatif pour les catégories C3D20B ($n = 70$) et C3D20C ($n = 12$), soit des étudiants à pratique de loisirs de construction nulle. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 147.

Tableau 147. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du MCT et les catégories de loisirs de construction pratiqués à l'âge adulte

Catégorie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
C3D20B	1	69	37,47	< 0,001
C3D20C	1	11	4,91	0,049
C3D21B	1	5	0,75	0,426
C3D21C	1	2	4,92	0,157

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de *F* ; *p* = valeur de *p*.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A80 en annexe, semble indiquer une progression pour ces deux catégories, avec une progression plus marquée pour la catégorie C3D20C, c'est-à-dire les étudiants avec une forte pratique d'autres loisirs.

En l'absence de résultats significatifs pour le R PSVT:R, le MRT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre évidence d'effet principal des catégories de loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution des scores de ces tests.

21.3.5.5 Loisirs artistiques pratiqués dans à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V et les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte indique un effet principal intra-sujet très significatif pour l'évolution au PSVT:V et les catégories de loisirs artistiques : $F(3,30) = 5,83$; $p = 0,003$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour la catégorie ART20B ($n = 31$) et la catégorie ART21B ($n = 42$). Ces deux catégories concernent des étudiants sans pratique de loisirs artistiques et avec une pratique d'autres loisirs modérée (ART20B) et des étudiants avec pratique de loisirs artistiques modérée (ART21B) et avec une pratique forte d'autres loisirs. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 148.

Tableau 148. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du PSVT:V et les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte

Catégorie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
ART20B	1	30	17,86	< 0,001
ART20C	1	1	1,00	0,500
ART21B	1	41	15,23	< 0,001
ART21C	1	1	3,06	0,330
ART22B	1	5	3,26	0,131
ART22C	1	1	1,00	0,500

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de *F* ; *p* = valeur de *p*.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A81 en annexe, semble indiquer une progression pour ces deux catégories, avec une progression plus marquée

pour la catégorie ART20B, c'est-à-dire les étudiants avec pratique de loisirs nulle et forte pratique d'autres loisirs.

En l'absence de résultats significatifs pour le R PSVT:R, le MRT, le MCT et le CFT, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.5.6 Hypothèse EHS11, EHS12, EHS13, EHS15 et EHS15: L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, les fréquences des catégories de performance aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial sont décrites dans le tableau 149.

Tableau 149. Distribution corrigée des étudiants selon les groupes de performance académique pour les tests spatiaux

Groupes académiques	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
MSOL 1	22	30,1	23	28,8	23	28,8	23	28,8	23	28,8
MSOL 2	41	56,2	46	57,5	46	57,5	46	57,5	46	57,5
MSOL 3	10	13,7	11	13,8	11	13,8	11	13,8	11	13,8
Total	73	100	80	100	80	100	80	100	80	100
MAPP 1	23	31,5	25	31,3	25	31,3	25	31,3	25	31,3
MAPP 2	39	53,4	41	51,3	41	51,3	41	51,3	41	51,3
MAPP 3	11	15,1	14	17,5	14	17,5	14	17,5	14	17,5
PCAT 1	18	24,7	19	23,8	19	23,8	19	23,8	19	23,8
PCAT 2	41	56,2	44	55,0	44	55,0	44	55,0	44	55,0
PCAT 3	14	19,2	17	21,3	17	21,3	17	21,3	17	21,3
Total	73	100	80	100	80	100	80	100	80	100
AMEC 1	26	35,6	28	35,0	28	35,0	28	35,0	28	35,0
AMEC 2	35	47,9	39	48,8	39	48,8	39	48,8	39	48,8
AMEC 3	12	16,4	13	16,3	13	16,3	13	16,3	13	16,3
ALGO 1	21	28,8	22	27,5	22	27,5	22	27,5	22	27,5
ALGO 2	38	52,1	42	52,5	42	52,5	42	52,5	42	52,5
ALGO 3	14	19,2	16	20,0	16	20,0	16	20,0	16	20,0
Total	73	100	80	100	80	100	80	100	80	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les évaluations académiques.

En l'absence de résultats significatifs pour les tests spatiaux, nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de performance aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.5.7 MSOL et AMEC

Nous constatons un effet principal intra-sujet significatif entre les catégories de performance en MSOL et en AMEC pour l'évolution de la performance au PSVT:V : $F(1,15) = 4,73$; $p =$

0,046. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction MSOL et AMEC, décrites dans le tableau A35 en annexe, révèle que tous les groupes progressent à l'exception des étudiants des catégories de scores MSOL faibles et scores AMEC élevés ($M_1 = 29,33$, $ES_1 = 1,57$; $M_2 = 29,00$, $ES_2 = 0,77$) et des étudiants des catégories de scores MSOL faibles et scores AMEC faibles ($M_1 = 29,00$, $ES_1 = 1,93$; $M_2 = 27,5$, $ES_2 = 0,94$) qui régressent. La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores MSOL élevés et scores AMEC modérés ($M_1 = 26,19$, $ES_1 = 1,93$; $M_2 = 29,31$, $ES_2 = 0,46$). Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,008$) et au second recueil ($p = 0,051$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires.

21.3.5.8 PCAT et ALGO

Nous constatons un effet principal intra-sujet significatif entre les catégories de performance en PCAT et ALGO pour l'évolution de la performance au MRT : $F(2,21) = 7,40$; $p = 0,004$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction PCAT et ALGO, décrites dans le tableau A36 en annexe, révèle que tous les groupes progressent à l'exception des étudiants des catégories de scores PCAT élevés et scores ALGO élevés qui régressent ($M_1 = 15,58$, $ES_1 = 1,72$; $M_2 = 15,00$, $ES_2 = 1,38$). La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores PCAT élevés et scores ALGO faibles ($M_1 = 13,67$, $ES_1 = 2,55$; $M_2 = 18,00$, $ES_2 = 2,04$). Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,010$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires.

Nous constatons un effet principal intra-sujet significatif entre les catégories de performance en PCAT et ALGO pour l'évolution de la performance au CFT : $F(2,21) = 3,62$; $p = 0,045$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction PCAT et ALGO, décrites dans le tableau A37 en annexe, révèle que tous les groupes progressent. La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores PCAT élevés et scores ALGO faibles ($M_1 = 110,00$, $ES_1 = 16,60$; $M_2 = 142,67$, $ES_2 = 16,09$).

21.3.5.9 PCAT et AMEC

Nous constatons un effet principal intra-sujet faiblement significatif entre les catégories de performance en PCAT et AMEC pour l'évolution de la performance au MRT : $F(1,21) = 4,20$; $p = 0,053$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction PCAT et AMEC, décrites dans le tableau A38 en annexe, révèle que tous les groupes progressent. La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores PCAT modérés et scores AMEC faibles ($M_1 = 13,00$, $ES_1 = 1,97$; $M_2 = 16,40$, $ES_2 = 1,58$). Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,010$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires.

21.3.5.10 MAPP et ALGO

Nous constatons un effet principal intra-sujet significatif entre les catégories de performance en MAPP et ALGO pour l'évolution de la performance au MRT : $F(2,21) = 5,17$; $p = 0,015$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction MAPP et ALGO, décrites dans le tableau A39 en annexe, révèle que tous les groupes progressent. La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores MAPP élevés et scores ALGO élevés ($M_1 = 10,60$, $ES_1 = 1,97$; $M_2 = 14,00$, $ES_2 = 1,58$). Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,010$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires.

21.3.5.11 MAPP, PCAT et ALGO

Nous constatons un effet principal intra-sujet significatif entre les catégories de performance en MAPP, PCAT et ALGO pour l'évolution de la performance au MRT : $F(1,21) = 7,20$; $p = 0,014$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction MAPP, PCAT et ALGO, décrites dans le tableau A40 en annexe, révèle que tous les groupes progressent à l'exception des étudiants des catégories de scores PCAT élevés, scores ALGO élevés et scores MAPP modérés qui régressent ($M_1 = 18,50$, $ES_1 = 2,33$; $M_2 = 16,33$, $ES_2 = 1,86$), des étudiants des catégories de scores PCAT faibles, scores ALGO élevés et scores MAPP modérés qui régressent ($M_1 = 19,00$, $ES_1 = 4,41$; $M_2 = 18,00$, $ES_2 = 3,53$) et des étudiants des catégories de scores PCAT faibles, scores ALGO faibles et scores MAPP modérés qui stagnent ($M_1 = 16,00$, $ES_1 = 4,41$; $M_2 = 16,00$, $ES_2 = 3,53$). La plus forte progression concerne les étudiants des catégories de scores PCAT élevés, scores ALGO modérés et scores MAPP modérés ($M_1 = 14,00$, $ES_1 = 2,70$; $M_2 = 19,00$, $ES_2 = 2,16$), les étudiants des catégories de scores PCAT modérés, scores ALGO élevés et scores MAPP élevés ($M_1 = 11,50$, $ES_1 = 3,12$; $M_2 = 16,50$, $ES_2 = 2,50$) et les étudiants des catégories de scores PCAT faibles, scores ALGO élevés et scores MAPP élevés ($M_1 = 9,00$, $ES_1 = 4,41$; $M_2 = 14,00$, $ES_2 = 3,53$). Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,010$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires.

21.3.6 Hypothèse EHS16, EHS17 et EHS18 : L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies, au changement de stratégies et aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées au second recueil dans les verbatim.

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour l'ANOVA mixte pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 150.

Tableau 150. Distribution corrigée des étudiants selon le nombre de stratégies, le changement de stratégie et les combinaisons de stratégies pour les tests spatiaux

Variables Stratégie	PSVT:V		R PSVT:R		MRT		MCT		CFT	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
<i>N</i> = 1	46	59,0	59	69,4	57	69,5	31	39,2	61	70,9
<i>N</i> = 2	27	34,6	24	28,2	23	28,0	35	44,3	25	29,1
<i>N</i> = 3	5	6,4	2	2,4	2	2,4	13	16,5	51	59,3
Total	78	100	85	100	82	100	79	100	86	100
Changement	38	48,7	59	69,4	58	70,7	25	31,6	35	40,7
Pas de changement	40	51,3	26	30,6	24	29,3	54	68,4	61	70,9
Total	78	100	85	100	82	100	79	100	86	100
Combinaison QCMA			3	3,5	1	1,2	2	2,5	3	3,5
Combinaison QCMB									8	9,3
Combinaison QCMC	2	2,6	1	1,2	1	1,2				
Combinaison QCMD									2	2,3
Combinaison QCME	2	2,6	2	2,4						
Combinaison QCMF	1	1,3	2	2,4						
Combinaison QCMG					2	2,4				
Combinaison QCMI							2	2,5		
Combinaison QCMJ							1	1,3		
Combinaison QCMK							3	3,8		
Combinaison QCML					2	2,4				
Combinaison QCMM									52	60,5
Combinaison QCMN	46	59,0	36	42,4	2	2,4			11	12,8
Combinaison QCMO									9	10,5
Combinaison QCMP	4	5,1	15	17,6	1	1,2				
Combinaison QCMQ	16	20,5	26	30,6	2	2,4				
Combinaison QCMR					25	30,5				
Combinaison QCMS	3	3,8			4	4,9				
Combinaison QCMU							33	41,8		
Combinaison QCMV							38	48,1		
Combinaison QCMW					37	45,1				
Combinaison QCMX	4	5,1			5	6,1				
Total	84	100	85	100	82	100	79	100	86	100

Légende. *n* = nombre de sujets supérieur à 0 ; % = pourcentage de sujets supérieur à 0 ; *N* = nombre de stratégies. Les descriptions des combinaisons se trouvent dans le tableau 20.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les facteurs nombre de stratégies, changement de stratégie et combinaisons de stratégies.

Nous allons présenter les résultats pour le nombre de stratégies, suivi du changement de stratégie, puis pour les combinaisons de stratégies, et les éventuelles interactions avec plusieurs facteurs.

21.3.6.1 Nombre de stratégies déclarées mobilisées déclarées au second recueil dans les verbatim

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, le changement de stratégie, les combinaisons de stratégie et le nombre de stratégies déclarées dans les verbatim au second recueil indique un effet principal intra-sujet faiblement significatif pour l'évolution au PSVT:V

et le nombre de stratégies : $F(2,55) = 3,04$; $p = 0,056$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour les étudiants qui, au second recueil, déclarent utiliser une stratégie ($n = 46$) : $F(1,45) = 24,42$; $p < 0,001$ et les étudiants qui en déclarent deux ($n = 27$) : $F(1,26) = 16,06$; $p < 0,001$. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 151.

Tableau 151. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du PSVT:V et les catégories de nombre de stratégies déclarées dans les verbatim

Nombre de stratégies	ddl 1	ddl 2	F	p
1	1	45	24,42	< 0,001
2	1	26	16,10	< 0,001
3	1	4	0,86	0,405

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A82 en annexe, semble indiquer une forte progression pour ces deux catégories.

Nous n'observons pas de résultats significatifs pour l'évolution au R PSVT:R, au MRT, au MCT et au CFT. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim du deuxième recueil sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.6.2 Changement de stratégie dans les verbatim

Nous n'observons pas de résultats significatifs pour l'évolution aux tests spatiaux et le changement de stratégie. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du changement de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim du deuxième recueil sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.3.6.3 Combinaison de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies

On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution au PSVT:V, le changement de stratégie, le nombre de stratégies déclarées et les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies au second recueil indique un effet principal intra-sujet significatif pour l'évolution au PSVT:V et les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées : $F(7,55) = 2,49$; $p = 0,027$.

L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour les étudiants qui, au second recueil, déclarent utiliser la combinaison QCMN ($n = 51$) : $F(1,50) = 22,12$; $p < 0,001$ et les étudiants qui déclarent la combinaison QCMQ ($n = 17$) : $F(1,16) = 24,09$; $p < 0,001$ et un résultat significatif pour les étudiants qui déclarent la combinaison QCMX ($n = 4$) : $F(1,3) = 13,44$; $p = 0,035$. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 152.

Tableau 152. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution du PSVT:V et les catégories de combinaisons de stratégies déclarées dans les QCM

Combinaison de stratégie	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
QCMC	1	1	4,00	0,295
QCMN	1	50	22,12	< 0,001
QCMP	1	3	1,15	0,362
QCMQ	1	16	24,09	< 0,001
QCMS	1	2	1,00	0,423
QCMX	1	3	13,44	0,035

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de F ; *p* = valeur de p.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A83 en annexe, semble indiquer une progression pour ces combinaisons. Toutes ces stratégies utilisent la rotation mentale, seule ou combinée à une autre stratégie : QCMN (RM), QCMQ (SARM) et QCMX (TRRM) au deuxième recueil. Seule la catégorie QCMX comprend la stratégie de changement de point de vue : c'est la catégorie qui semble marquer la plus forte progression. C'était aussi la plus faible au premier recueil. L'écart de performance avec les autres catégories semble fortement réduit suite à cette progression.

Nous n'observons pas de résultats significatifs pour l'évolution au R PSVT:R, au MRT, au MCT et au CFT. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim du deuxième recueil sur l'évolution de la performance à ces tests.

21.4 Récapitulatif des résultats de ce chapitre

Code	Hypothèse	Résultat
EHS1	Les scores des tests spatiaux ont évolué entre les deux prises de données.	Les scores des cinq tests spatiaux augmentent significativement au second recueil. La progression est supérieure à celle due à l'effet d'entraînement. La performance au second recueil est liée à la performance au premier recueil.
EHS2	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au genre.	Les femmes progressent d'avantage que les hommes au PSVT:V et au MRT. Il n'y pas de progression significative liée au genre au R PSVT:R, MCT et CFT.
EHS3	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la prévalence manuelle.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence d'évolution des scores spatiaux liée à la prévalence manuelle.
EHS4	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la formation.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants avec bagage technologique progressent plus que les autres étudiants au MRT. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence d'évolution des scores au PSVT:V, au R PSVT:R, au MCT et au CFT liée au bagage technologique.

EHS5	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la pratique de logiciels antérieure aux enseignements.	<ul style="list-style-type: none"> • Nous constatons un effet principal de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution de la performance au R PSVT:R. • Les étudiants avec et sans pratique de logiciel de modélisation ont progressé au MCT. • Les étudiants avec et sans pratique de logiciel de modélisation ont progressé au CFT. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution de la performance au PSVT:V et au MRT.
EHS6	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de logiciels pratiqués avant les enseignements.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants sans pratique et ceux ayant pratiqué un et deux logiciels de modélisation ont progressé significativement au MCT. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution de la performance au PSVT:V, au R PSVT:R, au MRT et au CFT.
EHS7	L'évolution des tests spatiaux est liée au nombre de langues maternelles.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants ayant appris une et deux langues maternelles ont progressé significativement au PSVT:V. • Les étudiants ayant appris une langue maternelle progressent significativement au R PSVT:R, à la différence des étudiants en ayant appris deux. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'évolution significative liée au nombre de langues maternelles au MRT, au MCT et au CFT.
EHS8	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au niveau d'anglais.	<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants dont les scores de TOEIC sont moyens et faibles progressent d'avantage au PSVT:V que les étudiants aux scores de TOEIC élevés. Les étudiants aux scores de TOEIC moyens et élevés maintiennent leur avantage au PSVT:V au second recueil.

		<ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants dont les scores de TOEIC sont moyens progressent significativement au R PSVT:R. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'évolution significative au MRT, MCT et CFT liée à la performance au TOEIC. • L'interaction entre l'évolution de la performance au PSVT:V, le nombre de langues maternelles et le niveau d'anglais montre une progression plus importante pour les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant des scores modérés et faibles au TOEIC. • L'interaction entre l'évolution de la performance au R PSVT:R, le nombre de langues maternelles et le niveau d'anglais montre une régression des étudiants ayant appris une langue maternelle et obtenant les meilleurs scores en anglais. Toutes les autres catégories progressent, en particulier les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant des scores modérés et faibles en anglais.
EHS9	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiques dans l'enfance et l'adolescence.	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au MCT, au MRT et au CFT liée à la pratique de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests. • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au MRT liée à la pratique de loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs dynamiques, C3D et artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance aux tests spatiaux.

EHS10	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux loisirs pratiques à l'âge adulte.	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au PSVT:V liée à la pratique de loisirs dynamiques de l'âge adulte. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests spatiaux. • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au R PSVT:R liée à la pratique de loisirs manipulatoires de l'âge adulte. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests. • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au PSVT:V et au MCT liée à la pratique de loisirs de construction de l'âge adulte. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests. • Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au PSVT:V liée à la pratique de loisirs artistiques de l'âge adulte. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance aux tests spatiaux.
EHS11-15	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée à la performance aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.	<ul style="list-style-type: none"> • Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien significatif entre la performance aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO et l'évolution de la performance aux tests spatiaux. • Quatre interactions avec plusieurs facteurs entre l'évolution de la performance au MRT et la performance à certains enseignements sont relevés, ainsi qu'une interaction pour l'évolution au PSVT:V et au CFT.
EHS16	L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée au nombre de stratégies déclarées au second recueil dans les verbatim.	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une différence d'évolution de la performance au PSVT:V liée au nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim.

		<ul style="list-style-type: none"> Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence liée au nombre de stratégies déclarées et évolution de la performance au R PSVT:R, au MRT, au MCT et au CFT.
EHS17	L'évolution des tests spatiaux est liée à la capacité à changer de stratégie.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien significatif entre la capacité à changer de stratégie déclarée mobilisée dans les verbatim au second recueil et l'évolution de la performance aux tests spatiaux.
EHS18	L'évolution des tests spatiaux est liée aux combinaisons de stratégies.	Il existe une différence significative de l'évolution de la performance au PSVT:V liée aux combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim au recueil 2. Nous ne pouvons pas mettre en évidence cet effet principal pour les autres tests.

21.5 Synthèse des résultats

Les scores augmentent significativement pour tous les tests. Entre les deux prises de mesure, les étudiants ont comme seul point commun d'avoir suivi les mêmes enseignements scientifiques. Nous suggérons que cette progression est liée à ces apprentissages. Nous remarquons cependant que la progression varie selon les tests :

- les gains au R PSVT:R sont largement expliqués par l'effet d'entraînement ;
- les gains du PSVT:V et du MCT sont modérés et proches ;
- les gains les plus élevés concernent le MRT et le CFT ;
- les gains au CFT sont de loin les plus élevés.

Nous remarquons de plus que cette évolution n'est pas seulement due à l'effet d'entraînement et que la performance au second recueil est liée à celle du premier recueil : les écarts de performance sont maintenus suite aux enseignements du premier semestre.

Les hypothèses EHS2-EHS18 visent à identifier des variables expliquant ces progressions et à vérifier que la progression est la même quelles que soient les caractéristiques individuelles. Le tableau 153 indique pour chaque résultat significatif et faiblement significatif le nombre de test relatifs à ces deux facteurs, et lorsque le nombre est inférieur au total des tests spatiaux concernés, i.e. trois pour la visualisation spatiale et deux pour l'orientation spatiale, le sous-facteur concerné, i.e. rotation mentale ou transformation mentale pour la visualisation spatiale et un tout réorganisé et une partie d'un tout pour l'orientation spatiale. Par exemple, le genre est lié significativement, mais faiblement, à l'évolution de la performance à un test de rotation mentale et significativement au test de changement de point de vue.

Tableau 153. Récapitulatif des résultats significatifs et faiblement significatifs des hypothèses EHS liées aux scores spatiaux

Variable		Visualisation spatiale		Orientation spatiale	
		Facteur	N	Facteur	N
Genre	En faveur des femmes	RM (faible)	1/3	TR	1/2
Formation	Avec technologie	RM	1/3		0
	Pratique antérieure de logiciels de modélisation	VS	2/3	UT	1/2
	Nombre de logiciels pratiqués	TM	1/3		0
Nombre de langues maternelles		RM	1/3	TR	1/2
TOEIC		RM	1/3	TR	1/2
Loisirs : enfance et adolescence	dynamiques		0		0
	manipulatoires	VS	2/3	UT	1/2
	de construction		0		0
	2D	RM	1/3		0
	artistiques		0		0
Loisirs : âge adulte	dynamiques	0		TR	1/2
	manipulatoires	VS	2/3		0
	de construction	TM	1/3	TR	1/2
	2D		0		0
	artistiques		0	TR	1/2
Stratégies	Nombre		0	TR (faible)	1/2
	Combinaison		0	TR	1/2

Légende. N = nombre de tests ; >1 = plus d'une stratégie déclarée mobilisée.

VS = visualisation spatiale ; RM= rotation mentale ; TM = transformation mentale.

OS = orientation spatiale ; TR = un tout réorganisé ; UT = une partie d'un tout.

Nous pouvons voir à partir des résultats significatifs et faiblement significatifs des hypothèses EHS liées aux scores spatiaux regroupés dans le tableau 153 que :

- l'évolution du PSVT:V est liée aux variables extrinsèques genre, nombre de langues maternelles, niveau d'anglais à l'arrivée à l'école et à la variable intrinsèque nombre de stratégies. Pour ces trois variables, on constate une progression plus importante pour les femmes, les étudiants ayant appris deux langues maternelles, les étudiants dont les scores de TOEIC sont plus faibles et ceux qui déclarent mobiliser deux stratégies au second recueil. Toutes ces catégories ont produit les performances les plus faibles à la première prise de données. Ce résultat suggère que les enseignements du premier semestre ont permis de développer cette compétence et/ou les stratégies qui permettent de résoudre des tâches qui nécessitent de reconnaître un élément quelle que soit la représentation qui en est donnée.

- L'évolution des scores du PSVT:V est liée à la combinaison de stratégies déclarée mobilisée au deuxième recueil. Il serait intéressant d'identifier les combinaisons utilisées au premier recueil pour vérifier si un éventuel changement de stratégies entre les deux recueils expliquerait cette progression. De même pour le nombre de stratégies déclarées au second recueil.
- La progression des femmes plus élevée au MRT et au PSVT:V contredit les résultats de la méta-analyse d'Uttal *et al.* (2013) qui établit une progression équivalente pour les hommes et les femmes après avoir suivi des formations visant à développer les habiletés spatiales (p. 364). Les quarante-huit études retenues dans la méta-analyse utilisent indifféremment différents tests spatiaux et des sujets de différents âges et spécialisations. Il est important de rappeler que les étudiants de notre échantillon sont particuliers, car issus d'une double sélection pour les étudiants ayant suivi une classe préparatoire et d'une sélection pour les autres. Cette spécificité de notre échantillon pourrait expliquer l'absence de conformité de notre résultat. On peut en revanche le rapprocher de celui d'Uttal *et al.* concernant la progression plus importante des étudiants dont les scores étaient les plus faibles avant intervention (p. 365) pour le PSVT:V : les femmes de notre échantillon performant significativement moins bien au premier recueil que les hommes, en ce qui concerne l'échantillon qui a participé au premier recueil.
- Il n'y pas d'effet de la prévalence manuelle sur l'évolution en performance spatiale.
- Nos traitements ont mis en évidence des liens significatifs entre progression de la performance aux tests spatiaux, à l'exception du PSVT:V, et variables relatives à la formation antérieure. Les progressions des différentes catégories semblent cependant relativement homogènes et les écarts de performance maintenus.
- Nous observons des liens significatifs entre évolution des habiletés spatiales et loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence (catégories manipulative et 2D) et loisirs pratiqués à l'âge adulte (catégories dynamique, manipulative et construction). Cependant, les faibles effectifs de certaines catégories d'étudiants rendent l'interprétation de ces résultats difficile dans le cas de la pratique à l'âge adulte.
- Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet de la performance aux évaluations individuelles des enseignements reçus au premier semestre dont nous avons obtenu les scores. Nous observons cependant des interactions avec plusieurs facteurs significatives entre évolution de la performance spatiale et performance dans deux ou trois disciplines académiques pour un test de rotation mentale et les deux tests d'orientation spatiale. Ce résultat suggère qu'aucun enseignement unique n'est lié à l'évolution des scores spatiaux. Il est possible que ce soit un ensemble d'enseignements qui aient permis cette évolution ou encore que ce soit d'autres enseignements, pour lesquels nous n'avons pas obtenu les scores. Il se peut aussi que la progression en habileté spatiale ne soit pas liée à la maîtrise des enseignements reçus.

Chapitre 22. Évolutions en modélisation volumique suite à des enseignements en école d'ingénieurs spécialisée en mécanique

Dans ce chapitre, nous allons éprouver les hypothèses relatives à l'Évolution de la Modélisation Volumique EMV1-EMV17 explorant la relation entre évolution en performance en modélisation et caractéristiques individuelles, la relation entre évolution en performance en modélisation et enseignements reçus au premier semestre et la relation entre évolution en performance en modélisation et stratégies de modélisation. Les hypothèses EMV1-EMV12 concernent les variables extrinsèques à notre mesure de l'habileté spatiale :

- genre ;
- formation ;
- prévalence manuelle ;
- nombre de langues maternelles ;
- pratique de logiciels de modélisation antérieure aux enseignements ;
- nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant les enseignements ;
- pratique régulière de loisirs dans l'enfance et l'adolescence ;
- pratique régulière de loisirs à l'âge adulte ;
- niveau d'anglais ;
- enseignements de mécanique des solides (MSOL) ;
- enseignements de mathématiques appliquées (MAPP).

Les hypothèses EMV13-EMV17 concernent les variables intrinsèques à notre mesure :

- enseignements de prise en mains de CATIA (PCAT) ;
- enseignements d'analyse des mécanismes (AMEC) ;
- enseignements d'algorithmique (ALGO) ;
- évolution des scores spatiaux.

La synthèse des résultats de ces traitements statistiques se trouve paragraphe 22.5, p. 307.

22.1 Vérification de la normalité

Nous vérifions d'abord la normalité de la distribution des scores à l'exercice de modélisation du deuxième recueil afin d'orienter le choix des tests statistiques pertinents pour éprouver nos hypothèses. Cette évaluation contient des critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels.

98 étudiants ont participé aux deux recueils.

Les résultats du test de Shapiro-Wilk pour l'exercice de modélisation au premier et au deuxième sont très significatif $p < 0,001$, ce qui indique que leur distribution ne suit pas la loi normale. Compte tenu de ce résultat, nous allons utiliser les tests paramétriques pour tester nos hypothèses.

Tableau 154. Résultats du test de normalité des scores de modélisation aux deux recueils
($N = 98$)

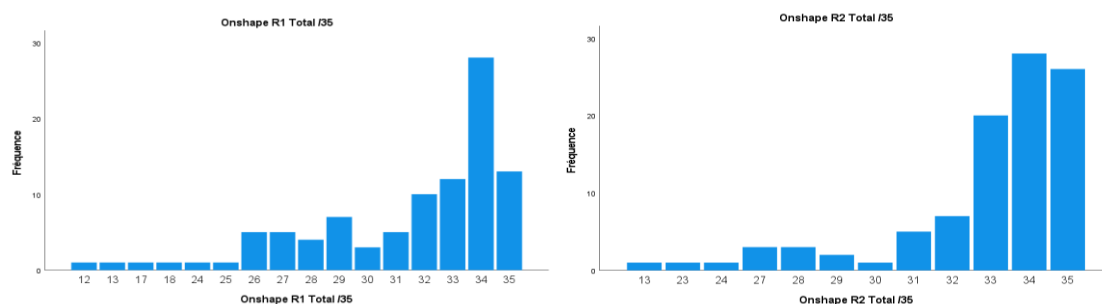
	Shapiro-Wilk		
	W	dl	p
Onshape R1 Total /35	0,749	98	0,000
Onshape R2 Total /35	0,643	98	0,000

Légende. W = statistique du test de Shapiro-Wilk, dl = degré de liberté, p = valeur de p , Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1, Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation au recueil 2.

Ce tableau indique le résultat du test, le degré de liberté et la significativité du résultat pour les scores de modélisation du premier et du deuxième recueil pour les étudiants ayant participé aux deux recueils.

Les graphiques à barres des deux recueils, illustrés dans les figures 77, montrent un resserrement des scores autour des valeurs 31 à 35 au second recueil

Figure 77. Distribution des scores de modélisation au premier et second recueil ($N = 98$)



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1, Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation au recueil 2.

Les graphiques décrivent le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.

On observe un étalement important des scores faibles et moyens alors que la distribution des scores entre 30 et 35 semble normale au premier recueil. Les scores se concentrent autour des valeurs 31 à 35 au second recueil.

22.2 Hypothèse EMV1 : Les scores de l'exercice de modélisation ont évolué entre les deux prises de données.

Nous utilisons le test du signe pour vérifier notre hypothèse. Le test indique un résultat très significatif : $p < 0,001$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A84 annexe, indique une progression de la performance de modélisation à la deuxième prise de données : les scores ont augmenté et se sont resserrés.

22.2.1 Effet d'entraînement

Les statistiques descriptives de l'évolution des scores indiquent un gain moyen de 1,60 et un écart type de 3,47. L'ensemble des statistiques descriptives et le rapport gain moyen/écart-type sont décrits dans le tableau 155.

Tableau 155. Gains moyens des scores à l'exercice de modélisation entre les deux recueils et écart-type

Évolution des scores	<i>N</i>	Minimum	Maximum	Gain moyen	Écart-type	Gain moyen/Écart type
Exercice de modélisation	98	-6	16	1,60	3,466	0,46

Légende. *N* = nombre d'étudiants ayant participé aux deux recueils.

Ce tableau décrit les gains moyens, les écart-types et le rapport gain moyen/écart-type pour la performance en modélisation. Ce dernier est supérieur au 0,2 attribuable à l'effet d'entraînement (Hopkins, 1998, p. 140).

Le rapport entre le gain moyen et l'écart-type étant supérieur à 0,2, nous en concluons que la progression n'est pas due qu'à l'effet d'entraînement et peut être expliquée par les enseignements du premier semestre, qui incluent l'apprentissage du modèleur volumique CATIA.

22.2.2 Effet de la performance initiale

De même que pour l'évolution des scores spatiaux, nous réalisons une analyse de régression linéaire pour déterminer si la performance au deuxième recueil, la variable dépendante, peut être prédite par la performance au premier recueil, la variable indépendante. Après avoir écarté les valeurs éloignées, on obtient un coefficient de 0,182 significatif $p < 0,001$ et une constante de 27,89 significative $p < 0,001$ pour $N = 87$ étudiants. L'équation de la régression linéaire peut s'écrire :

$$\text{Performance en modélisation au deuxième recueil} = 0,182 \times (\text{Performance en modélisation au recueil 1}) + 27,89$$

La performance au deuxième recueil dépend donc de la performance au premier recueil. Les écarts de niveaux initiaux sont maintenus à la deuxième prise de données.

22.3 Hypothèse EMV2-EMV16 : L'évolution de la performance en modélisation est liée aux caractéristiques individuelles.

Comme pour l'évolution de l'habileté spatiale, nous regroupons les variables par catégories pour réaliser les ANOVA à plans mixtes. Ces catégories sont décrites dans le tableau 156.

Tableau 156. Catégories de variables regroupées pour les ANOVA relatives à l'évolution de la performance en modélisation volumique

Catégorie	Variable	Hypothèse
Sociodémographique	Genre, prévalence manuelle	EMV2, EMV3
Formation	Formation antérieure, pratique de logiciels de modélisation, nombre de logiciels de modélisation	EMV4, EMV5, EMV6
Langues	Nombre de langues maternelles, performance au TOEIC	EMV7, EMV8
Loisirs enfance et adolescence	Dynamiques, manipulateurs, 2D, C3D, artistiques	EMV9
Loisirs adulte	Dynamique, manipulateur, 2D, C3D, artistique	EMV10
Enseignements du premier semestre à ISAE-Supméca	Performance en MSOL, MAPP, PCAT, AMEC, ALGO	EMV11, EMV12, EMV13, EMV14, EMV15
Habileté spatiale	Évolution des scores spatiaux	EMV16

Note. Ce tableau décrit les regroupements de variables en fonction de leur nature et les hypothèses de recherche s'y rapportant.

De même que pour l'analyse de l'évolution des scores spatiaux au chapitre 21, nous écartons les valeurs extrêmes communes à au moins deux catégories.

22.3.1 Hypothèses EMV2 et EMV3 : L'évolution des scores de modélisation est liée au genre et à la prévalence manuelle

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et le genre. De même pour la prévalence manuelle. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du genre et de la prévalence manuelle sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.2 Hypothèses EMV4, EMV5 et EMV6 : L'évolution des scores de modélisation est liée à la formation, à la pratique antérieure de logiciels de modélisation et au nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 157.

Tableau 157. Distribution corrigée des étudiants selon la formation, la pratique de logiciels de modélisation et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués pour l'évolution de la performance en modélisation

Catégories Formation	<i>n</i>	%
Avec technologie	54	56,8
Sans technologie	41	43,2
Total	95	100
Sans pratique de logiciels	11	11,6
Avec pratique de logiciels	84	88,4
Total	95	100
0 logiciel	11	11,6
1 logiciel	38	40,0
2 logiciels	39	41,1
3 logiciels	6	6,3
4 logiciels	1	1,1
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant participé aux tests spatiaux des recueils 1 et 2 pour les facteurs formation antérieure, pratique antérieure de logiciels de modélisation et nombre de logiciels de modélisation pratiqués.

Plus de 80% de notre échantillon a déjà utilisé un logiciel de modélisation. Environ 57% des étudiants ont reçu des enseignements technologiques dans leur formation post-bac.

Dans la catégorie des variables relatives à la formation antérieure, les ANOVA mixtes sont réalisées en regroupant les facteurs formation antérieure et pratique de logiciels de modélisation, puis les facteurs formation antérieure et nombre de logiciels, de manière à ne pas traiter les interactions pratique de logiciels et nombre de logiciels qui sont partiellement redondantes.

Nous allons présenter les résultats pour la formation antérieure, la pratique de logiciels, le nombre de logiciels de modélisation pratiqués, puis les éventuelles interactions avec plusieurs facteurs.

22.3.2.1 Formation antérieure

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation, la pratique de logiciels de modélisation et les catégories de formation antérieure indique un effet principal intra-sujet très significatif pour l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de formation antérieure : $F(1,91) = 11,58$; $p = 0,001$, ainsi qu'un effet inter-sujet principal très significatif : $F(1,91) = 18,06$; $p < 0,001$. Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,037$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour les étudiants sans bagage technologique ($n = 41$) : $F(1,40) = 22,07$; $p < 0,001$ et un résultat significatif pour les étudiants avec bagage technologique ($n = 54$) : $F(1,53) = 4,08$; $p = 0,049$.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A85 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les étudiants sans bagage technologique, pour dépasser la performance des étudiants avec bagage technologique au second recueil.

22.3.2.2 Pratique antérieure de logiciels de modélisation

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation, la pratique de logiciels de modélisation et les catégories de pratique de logiciels de modélisation indique un effet principal intra-sujet très significatif : $F(1,91) = 27,22$; $p < 0,001$, ainsi qu'un effet principal inter-sujet très significatif : $F(1,91) = 28,38$; $p < 0,001$. Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,037$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation ($n = 11$) : $F(1,10) = 11,55$; $p = 0,007$, et pour les étudiants avec pratique ($n = 84$) : $F(1,83) = 9,01$; $p < 0,001$. Le nombre d'étudiants sans pratique étant faible ($n = 11$), il est à prendre avec prudence.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales, illustrées dans la figure A86 en annexe, semble indiquer une progression plus importante pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation.

22.3.2.3 Nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre ISAE-Supméca

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués indique un effet principal intra-sujet très significatif : $F(4,87) = 7,09$; $p < 0,001$, ainsi qu'un effet principal inter-sujet très significatif pour l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de logiciels de modélisation pratiqués : $F(4,87) = 10,05$; $p < 0,001$. Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,034$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation ($n = 11$) et les étudiants ayant pratiqué un logiciel ($n = 38$) et un résultat significatif pour les étudiants ayant pratiqué deux logiciels ($n = 38$). Les étudiants ayant pratiqué trois logiciels ($n = 6$) n'ont pas progressé significativement. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que leur performance était très élevée au premier recueil, leur laissant peu de marge de progression. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 158.

Tableau 158. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et le nombre de logiciels de modélisation pratiqués

Nombre de logiciels de modélisation pratiqués	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
0 logiciel	1	10	11,55	0,007
1 logiciel	1	37	9,01	0,005
2 logiciels	1	38	3,77	0,059
3 logiciels	1	5	1,40	0,289

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de *F* ; *p* = valeur de *p*.

L'observation de l'évolution des moyennes marginales semble indiquer que les catégories d'étudiants ayant pratiqué moins de trois logiciels ont progressé. La progression la plus importante concerne les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation.

22.3.2.4 Interactions avec plusieurs facteurs

Nous constatons un effet principal significatif intra-sujet entre les catégories de formation, la pratique antérieure de logiciels de modélisation et l'évolution de la performance en modélisation : $F(1,91) = 21,29$; $p < 0,001$. Nous observons aussi un effet principal inter-sujet : $F(1,91) = 23,23$; $p < 0,001$. Le test de Levene basé sur la médiane est significatif au premier recueil ($p = 0,037$) : les distributions des catégories ne sont pas aléatoires. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction catégories de formation et pratique antérieure de logiciels de modélisation, décrites dans le tableau A41 en annexe, révèle que tous les groupes progressent, dans des mesures variables. La plus forte progression concerne l'étudiant de formation technologique et sans pratique de logiciels de modélisation ($M_1 = 13,00$, $ES_1 = 3,14$; $M_2 = 29,00$, $ES_2 = 1,99$), soit l'étudiant dont la performance était la plus faible au premier recueil. Les étudiants avec formation technologique et pratique antérieure de logiciels de modélisation ont très peu progressé ($M_1 = 32,58$, $ES_1 = 0,43$; $M_2 = 33,13$, $ES_2 = 0,27$). Ce sont les étudiants dont la moyenne était la plus élevée au premier recueil, dont la marge de progression est la plus faible.

Nous observons un effet principal significatif intra-sujet entre les catégories de formation, le nombre de logiciels de modélisation pratiqués et l'évolution de la performance en modélisation : $F(2,87) = 10,55$; $p < 0,001$. Nous constatons aussi un effet inter-sujet : $F(2,87) = 11,71$; $p < 0,001$. La consultation du tableau des moyennes marginales pour l'interaction catégories de formation et nombre de logiciels de modélisation pratiqués, décrites dans le tableau A42 en annexe, révèle que tous les groupes progressent, à l'exception de l'étudiant ayant pratiqué quatre logiciels de modélisation qui stagne. Ce résultat s'explique par le fait qu'il obtenu le score maximal aux deux recueils. On remarque aussi une progression faible pour les étudiants de formation technologique ayant pratiqué un ($M_1 = 31,76$, $ES_1 = 0,67$; $M_2 = 32,48$, $ES_2 = 0,43$), deux ($M_1 = 32,96$, $ES_1 = 0,62$; $M_2 = 33,32$, $ES_2 = 0,39$) et trois logiciels de modélisation ($M_1 = 33,50$, $ES_1 = 1,26$; $M_2 = 34,33$, $ES_2 = 0,80$). La plus forte progression concerne l'étudiant de formation technologique et sans pratique de logiciels de modélisation ($M_1 = 13,00$, $ES_1 = 3,10$; $M_2 = 29,00$, $ES_2 = 1,96$), soit l'étudiant dont la performance était la plus faible au premier recueil. En dehors de cet étudiant, les catégories qui progressent le plus sont les étudiants sans bagage technologique n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ($M_1 = 29,90$, $ES_1 = 0,98$; $M_2 = 33,30$, $ES_2 = 0,62$) ou n'en ayant pratiqué qu'un ($M_1 = 30,00$, $ES_1 = 0,75$; $M_2 = 33,06$, $ES_2 = 0,47$).

22.3.3 Hypothèses EMV7 et EMV8: L'évolution des scores de modélisation est liée au nombre de langues maternelles et au score de TOEIC

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus pour chaque test spatial est décrit dans le tableau 159.

Tableau 159. Distribution corrigée des étudiants selon le nombre de langues maternelles et le niveau d'anglais pour l'exercice de modélisation

Variables Langues		<i>n</i>	%
Nombre de langues maternelles apprises	1	84	89,4
	2	10	10,6
	Total	94	100
Performance au TOEIC	Élevée	24	25,5
	Modérée	46	48,9
	Faible	24	25,5
	Total	94	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation aux recueils 1 et 2 pour les facteurs nombre de langues maternelles et niveau d'anglais.

Plus de 80% de notre échantillon a appris une langue maternelle. Notre catégorisation des niveaux d'anglais répartit le premier quartile dans le groupe performance au TOEIC élevée, le deuxième et le troisième quartile dans le groupe performance au TOEIC modérée et le quatrième quartile dans le groupe performance au TOEIC faible.

Nous allons présenter les résultats pour le nombre de langues maternelles apprises, suivi du niveau d'anglais, puis les éventuelles interactions avec plusieurs facteurs.

22.3.3.1 Nombre de langues maternelles

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et le nombre de langues maternelles apprises. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du nombre de langues maternelles apprises sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.3.2 TOEIC

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de niveau de TOEIC. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal du niveau initial d'anglais sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.4 Hypothèse EMV9 : L'évolution des scores de modélisation est liée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.5 Hypothèse EMV10 : L'évolution des scores de modélisation est liée aux loisirs pratiqués à l'âge adulte

Après avoir écarté les valeurs extrêmes, le nombre d'étudiants retenus est décrit dans les tableaux 160-164. On attire l'attention sur les effectifs très faibles de certaines catégories sur l'interprétation des résultats présentés dans la partie relative aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.

Tableau 160. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs dynamique (DEPP) pratiqués à l'âge adulte pour l'exercice de modélisation

Catégories dynamiques	<i>n</i>	%
DEPP20B	3	3,2
DEPP20E	9	9,5
DEPP20F	1	1,1
DEPP20J	2	2,1
DEPP20K	31	32,6
DEPP20N	5	5,3
DEPP21A	2	2,1
DEPP21B	32	33,7
DEPP21C	2	2,1
DEPP21E	2	2,1
DEPP22B	5	5,3
DEPP22F	1	1,1
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation des recueils 1 et 2 pour les loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte.

Les catégories à plus forts effectifs concernent des pratiques peu et modérément fréquentes.

Tableau 161. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs manipulateurs (MR) pratiqués à l'âge adulte pour l'exercice de modélisation

Catégories manipulateurs	<i>n</i>	%
MR20B	1	1,1
MR20J	10	10,5
MR20K	26	27,4
MR20L	3	3,2
MR20M	2	2,1
MR20N	1	1,1
MR20O	1	1,1
MR21A	11	11,6
MR21B	31	32,6
MR21C	5	5,3
MR21E	1	1,1
MR22C	1	1,1
MR22E	1	1,1
MR22F	1	1,1
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation des recueils 1 et 2 pour les loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte.

Les catégories à plus forts effectifs concernent des pratiques peu et modérément fréquentes.

Tableau 162. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs 2D (2D) pratiqués à l'âge adulte pour l'exercice de modélisation

Catégories 2D	<i>n</i>	%
2D20B	52	54,7
2D20C	11	11,6
2D21B	14	14,7
2D21C	14	14,7
2D22B	1	1,1
2D22C	3	3,2
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation des recueils 1 et 2 pour les loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte.

Les catégories à plus forts effectifs concernent des pratiques peu et modérément fréquentes.

Tableau 163. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs de construction 3D (C3D) pratiqués à l'âge adulte pour l'exercice de modélisation

Catégories C3D	<i>n</i>	%
C3D20B	75	78,9
C3D20C	9	9,5
C3D21B	7	7,4
C3D21C	3	3,2
C3D22C	1	1,1
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation des recueils 1 et 2 pour les loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte.

Les catégories à plus forts effectifs concernent des pratiques peu fréquentes.

Tableau 164. Distribution corrigée des étudiants selon les catégories de loisirs artistiques (ART) pratiqués à l'âge adulte pour l'exercice de modélisation

Catégories artistiques	<i>n</i>	%
ART20B	41	43,2
ART20C	2	2,1
ART21B	43	45,3
ART21C	2	2,1
ART22B	5	5,3
ART22C	2	2,1
Total	95	100

Légende. *n* = nombre de sujets ; % = pourcentage de sujets.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants ayant réalisé l'exercice de modélisation des recueils 1 et 2 pour les loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte.

Les catégories à plus forts effectifs concernent des pratiques peu et modérément fréquentes.

Nous écartons de plus le sujet 6, qui représente les catégories à un seul sujet DEPP22F, MR22C, C3D22C et qui est présent dans les catégories à faible nombre de sujets 2D22C et ART20.

Nous allons présenter les résultats pour les loisirs dynamiques, suivi des loisirs manipulateurs, des loisirs 2D, des loisirs de construction 3D et finalement des loisirs artistiques.

22.3.5.1 Loisirs dynamiques pratiqués dans à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs dynamiques indique un effet principal intra-sujet très significatif : $F(7,38) = 3,25$; $p = 0,008$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour la catégorie DEPP21B ($n = 32$) : $F(1,31) = 13,90$; $p < 0,001$ et significatif pour la catégorie DEPP20K ($n = 31$) : $F(1,30) = 7,46$; $p = 0,010$. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 165.

Tableau 165. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte

Catégories dynamiques	<i>ddl 1</i>	<i>ddl 2</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
DEPP20B	1	2	0,92	0,438
DEPP20E	1	8	1,15	0,314
DEPP20J	1	1	1,00	0,500
DEPP20K	1	30	7,46	0,010
DEPP20N	1	4	0,00	1,000
DEPP21A	1	1	1,00	0,500
DEPP21B	1	31	13,90	< 0,001
DEPP21C	1	1	0,64	0,570
DEPP21E	1	1	0,11	0,795
DEPP22B	1	4	2,28	0,206

Légende. *ddl* = degré de liberté ; *F* = valeur de F ; *p* = valeur de p.

L'observation des tracés des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A88 en annexe, semble indiquer une progression similaire de ces deux catégories, c'est-à-dire les étudiants qui pratiquent un nombre de loisirs dynamiques réels modéré, un nombre de loisirs dynamiques virtuels nul et un nombre d'autres loisirs modéré (DEPP20K) et les étudiants qui pratiquent un nombre de loisirs dynamiques réels modéré, un nombre de loisirs dynamiques virtuels modéré et un nombre d'autres loisirs modéré (DEPP21B).

22.3.5.2 Loisirs manipulateurs pratiqués dans à l'âge adulte

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs manipulateurs pratiqués au moment de la prise données. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.5.3 Loisirs 2D pratiqués dans à l'âge adulte

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs 2D pratiqués au moment de la prise données. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs 2D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.5.4 Loisirs de construction 3D pratiqués dans à l'âge adulte

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués au moment de la prise de données. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.5.5 Loisirs artistiques pratiqués dans à l'âge adulte

L'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs artistiques indique un effet principal intra-sujet très significatif : $F(2,38) = 3,99$; $p = 0,027$. L'ANOVA à mesures répétées à un facteur indique un effet simple très significatif pour la catégorie ART20B ($n = 41$) : $F(1,40) = 10,54$; $p = 0,002$ et un résultat significatif pour la catégorie ART21B ($n = 43$) : $F(1,42) = 7,09$; $p = 0,011$. L'ensemble des résultats est décrit dans le tableau 166.

Tableau 166. Tests des effets simples mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte

Catégories dynamiques	ddl 1	ddl 2	F	p
ART20B	1	40	10,54	0,002
ART21B	1	42	7,09	0,011
ART21C	1	1	0,184	0,742
ART22B	1	4	3,55	0,133

Légende. ddl = degré de liberté ; F = valeur de F ; p = valeur de p.

L'observation des tracés des moyennes marginales estimées, illustrées dans la figure A89 en annexe, semble indiquer une progression pour ces deux catégories à pratique nulle (ART20B) et modérée (ART21B) de loisirs artistiques.

22.3.6 Hypothèse EMV11, EMV12, EMV13, EMV14 et EMV15: L'évolution des scores aux tests spatiaux est liée aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.

Nous n'observons pas de résultat significatif à l'ANOVA mixte mettant en regard l'évolution de la performance en modélisation et les catégories de performance aux évaluations en MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO. Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de performance aux évaluations en MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO sur l'évolution des scores de modélisation.

22.3.7 Hypothèse EMV16 : L'évolution de la performance en modélisation est liée à l'évolution des scores spatiaux.

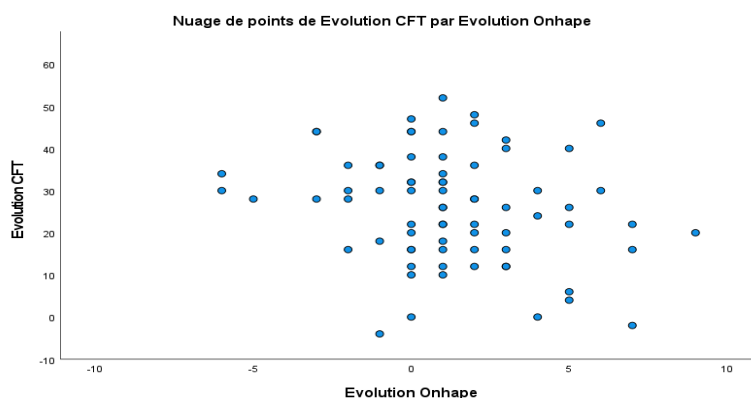
Pour éprouver cette hypothèse, nous réalisons des analyses de régression linéaire dans lesquelles la variable dépendante la différence entre les scores à l'exercice de modélisation à la première prise de données et la seconde et les variables indépendantes sont la différence entre les scores spatiaux à la première prise de données et la seconde. Nous écartons les neuf étudiants qui ont obtenu la totalité des points aux deux prises de performance de la modélisation puisque notre évaluation ne permet pas de déterminer s'ils ont stagné ou progressé. De plus nous

écartons l'étudiant identifié comme valeur éloignée après avoir effectué un diagnostic des observations.

Le résultat de l'analyse de régression linéaire entre l'évolution des scores à l'exercice de modélisation et l'évolution des scores au CFT indique un résultat faiblement significatif pour 74 étudiants : on obtient un coefficient de -0,051 faiblement significatif ($p = 0,052$) et une constante de 2,59 significative ($p < 0,001$). Ce résultat indique que l'évolution au CFT prédirait une évolution inverse à l'exercice de modélisation. La faiblesse du coefficient peut s'expliquer par le fait que le gain moyen au CFT de 2,00 est bien supérieur au gain moyen en modélisation qui est de 0,46. La négativité du coefficient s'explique parce que d'avantage d'étudiants régressent en modélisation ($n = 15$) que d'étudiants au CFT ($n = 3$).

L'observation de nuages de points, illustré figure 7 !, montre une faible concentration des points autour de la droite de régression. On constate aussi quelques étudiants qui ont beaucoup progressé en modélisation mais peu en CFT et un nombre plus important d'étudiants qui ont beaucoup progressé au CFT mais peu progressé, voire régressé en modélisation. Nous ne pouvons pas retenir la régression entre progression en modélisation et progression au CFT.

Figure 78. Progression en modélisation mise en regard avec la progression au CFT



Légende. EvolutionCFT = différence entre les scores de CFT au recueil 1 et scores de CFT au recueil 2, Evolution Onshape = différence entre les scores de modélisation au recueil 1 et scores de modélisation au recueil 2. La dispersion des points n'est pas concentrée sur la droite de corrélation.

Nous écartons aussi tous les étudiants qui ont obtenu la totalité des points aux deux prises de performance du PSVT:V et du R PSVT:R pour leurs analyses respectives puisque ces échelles ne permettent pas de déterminer s'ils ont stagné ou progressé à ces deux compétences. Les résultats des analyses de régression linéaire entre l'évolution des scores à l'exercice de modélisation et l'évolution des scores du PSVT:V, du R PSVT:R, du MRT et du MCT ne sont pas significatifs.

Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre l'évolution de la performance en modélisation et l'évolution des scores spatiaux.

22.4 Hypothèse EMV17 : La stratégie de définition de la longueur totale de la pièce des étudiants évolue

Nous souhaitons vérifier si un nombre significativement plus important d'étudiants adoptent une stratégie de définition de la longueur totale au deuxième recueil, c'est-à-dire après avoir

reçu les enseignements du premier semestre. Pour ce faire, nous identifions, pour chaque prise de performance, le nombre d'étudiants ayant adopté les stratégies de définition de la longueur totale, i.e. par le calcul ou la définition de la longueur entre les deux extrémités de la pièce, et de non-définition de la longueur totale. La fréquence des stratégies adoptées aux deux recueils est décrite dans le tableau 167.

Tableau 167. Table de fréquence des stratégies de définition de la longueur totale adoptée aux deux recueils

Stratégie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
Définition	86	87,75	94	96,00
Non-définition	12	11,25	4	4,00
Total	98	100	98	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

Ce tableau décrit le nombre d'étudiants selon la stratégie de définition de la longueur totale qu'ils ont adoptée aux deux prises de performance.

Nous utilisons le test de McNemar (1947) pour comparer « des données appariées concernant des variables qualitatives dichotomiques » (Kinnear et Gray, 2015, p. 174). Le résultat est faiblement significatif : $p = 0,57$. Un nombre plus important d'étudiants adoptent une stratégie de définition de la longueur totale à la seconde prise de performance.

22.5 Récapitulatif des résultats de ce chapitre

Code	Hypothèse	Résultat
EMV1	Les scores de l'exercice de modélisation ont évolué entre les deux prises de données.	Les scores de l'exercice de modélisation augmentent significativement au second recueil. La progression est supérieure à celle due à l'effet d'entraînement. La performance au second recueil est liée à la performance au premier recueil.
EMV2	L'évolution de la performance en modélisation est liée au genre.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence d'évolution en modélisation liée au genre.
EMV3	L'évolution de la performance en modélisation est liée à la prévalence manuelle.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence d'évolution en modélisation liée à la prévalence manuelle.
EMV4	L'évolution de la performance en modélisation est liée à la formation.	Les étudiants sans bagage technologique ont davantage progressé à l'exercice de modélisation.
EMV5	L'évolution de la performance en modélisation est liée à la pratique antérieure de logiciels.	Les étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ont davantage progressé à l'exercice de modélisation.
EMV6	L'évolution de la performance en modélisation est liée au nombre de logiciels pratiqués avant les enseignements.	<ul style="list-style-type: none"> Les étudiants ayant pratiqué moins de 3 logiciels de modélisation ont progressé significativement à l'exercice de modélisation.

		<ul style="list-style-type: none"> • L'interaction entre les facteurs formation et pratique antérieure de logiciels de modélisation et l'évolution de la performance en modélisation montre que les étudiants qui progressent le plus n'ont pas de bagage technologique, quelle que soit leur pratique de logiciels de modélisation. • L'interaction entre formation et nombre de logiciels pratiqués et l'évolution de la performance en modélisation montre que les étudiants qui progressent le plus n'ont pas de bagage technologique et n'ont pratiqué qu'un ou deux logiciels de modélisation.
EMV7	L'évolution de la performance en modélisation est liée au nombre de langues maternelles.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'évolution significative de la performance en modélisation liée au nombre de langues maternelles apprises.
EMV8	L'évolution de la performance en modélisation est liée au niveau d'anglais.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'évolution significative d'évolution de la performance en modélisation liée à la performance au TOEIC.
EMV9	L'évolution de la performance en modélisation est liée aux loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence sur l'évolution de la performance en modélisation.
EMV10	L'évolution de la performance en modélisation est liée aux loisirs pratiqués à l'âge adulte.	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une différence significative d'évolution de la performance en modélisation liée à la pratique de loisirs dynamiques et artistiques à l'âge adulte. • Nous ne pouvons pas mettre en évidence d'effet principal des catégories de loisirs manipulatoires, 2D et de construction 3D pratiqués à l'âge adulte sur l'évolution de la performance en modélisation.
EMV11-15	L'évolution de la performance en modélisation est liée à la performance aux enseignements MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien significatif entre les catégories de performance aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO et l'évolution de la performance en modélisation.
EMV16	L'évolution de la performance en modélisation est liée à l'évolution des scores spatiaux.	L'évolution de la performance en modélisation n'est pas liée à l'évolution des scores spatiaux.

EMV17	La stratégie de définition de la longueur totale est significativement différente au recueil 2 : un nombre plus important d'étudiants adopte une stratégie efficace.	Un nombre plus important d'étudiants adoptent une stratégie de définition de la longueur totale à la deuxième prise de performance. La significativité de ce résultat est faible.
-------	--	---

22.6 Synthèse des résultats de ce chapitre

Nos traitements ont permis d'identifier :

- une progression significative de la performance en modélisation entre les deux recueils ;
- que cette évolution n'est pas seulement due à l'effet d'entraînement ;
- que la performance au second recueil est liée à celle du premier recueil : les écarts de performance sont maintenus ;
- les étudiants qui progressent le plus n'ont pas de bagage technologique et n'ont pratiqué aucun logiciel de modélisation ($n=10$), c.à.d. les étudiants dont la performance était la plus faible au premier recueil ;
- la stratégie de définition de la longueur totale évolue entre les deux recueils : suite aux enseignements, un nombre plus important d'étudiants adoptent une stratégie de définition de la longueur totale. Cette cote étant disponible dans la vue de la figure en perspective, nous en concluons que davantage d'étudiants ont pris en considération les informations dans les représentations des objets qu'ils doivent modéliser.

Chapitre 23. Étude qualitative de la performance en modélisation volumique à partir de l'encodage d'un échantillon de vingt-huit vidéos

Dans ce chapitre, nous étudions l'activité de modélisation d'un échantillon de vingt-huit étudiants au travers des données produites par l'encodage des vidéos issues de la captation de leur activité à l'écran et du filmage de la partie supérieure de leur corps. Ces étudiants ont été choisis pour l'encodage car ils avaient été sélectionnés pour la troisième phase de l'expérimentation pour vingt-quatre d'entre eux et parce que leur nom de famille se trouvait en tête de liste alphabétique pour les quatre autres.

Les hypothèses relatives à l'Étude Qualitative en Modélisation Volumique EQMV1-EQMV5 portent sur la relation entre la performance et des variables intrinsèques de stratégie et de performance :

- nombre d'actions avortées ;
- nombre d'erreurs ;
- capacité à factoriser certaines actions ;
- nombre d'actions ;
- temps de réalisation.

Les hypothèses EQMV6-EQMV10 portent sur l'évolution des performances en modélisation et stratégies mobilisées à l'issue du premier semestre d'enseignement :

- évolution des scores de l'exercice de modélisation ;
- évolution des temps de réalisation ;
- évolution du nombre d'actions ;
- évolution de l'efficacité des étudiants ;
- évolution du nombre d'actions de tâtonnement.

Nous vérifierons d'abord la normalité de la distribution des scores de l'exercice de modélisation de cet échantillon restreint afin d'orienter le choix des tests statistiques pertinents pour éprouver nos hypothèses.

La synthèse des résultats de ces traitements statistiques se trouve paragraphe 23.12, p. 316.

23.1 Vérification de la normalité

Le résultat du test de Shapiro-Wilk pour l'exercice de modélisation de l'échantillon restreint est très significatif pour les deux recueils, comme pour l'échantillon total : au recueil 1 ($N = 28$), $W = 0,79$; $p < 0,001$ et au recueil 2 ($N = 28$), $W = 0,80$; $p < 0,001$. Compte tenu de ce résultat, nous allons utiliser les tests paramétriques pour tester nos hypothèses. Les hypothèses EQMV1-EQMV5 concernent une éventuelle relation entre des variables à plus de deux catégories, e.g. les variables nombre d'actions avortées, nombre d'erreurs et nombre d'actions factorisées, et la performance en modélisation à un recueil donné. Elles seront traitées avec le test de Kruskal-Wallis pour échantillons indépendants. Les hypothèses EQMV6-EQMV10 concernent l'évolution d'une variable continue, e.g. temps de réalisation en secondes, entre les deux recueils. Elles seront testées à l'aide du test du signe pour échantillons liés.

Les vingt-quatre étudiants ayant été choisis en raison du fait qu'ils avaient participé à toutes les expérimentations, en vue du recueil 3, ont comme caractéristique commune une assiduité exemplaire. Celle-ci est peut-être due à une motivation particulière ou à un niveau de confiance en soi vis-à-vis de nos tâches expérimentales qui pourraient être liés à une performance élevée. En raison de la spécificité de cet échantillon, nous décidons de décrire dans ce chapitre les résultats significatifs ainsi que les résultats faiblement significatifs $p < 0,1$. Compte tenu du faible effectif et de la faible significativité des résultats, nous présentons ces résultats avec prudence. Néanmoins, nous mettons en avant ici des tendances qui demandent à être investiguées sur des effectifs plus conséquents.

23.2 Hypothèse EQMV1 : La performance est liée au nombre d'actions avortées.

Nous interrogeons la relation entre performance à l'exercice de modélisation et nombre d'actions avortées. Celui-ci a été découpé en trois catégories selon que le nombre d'actions avortées est faible, modéré ou élevé, comme décrit chapitre 17. Leur distribution est décrite dans le tableau 168.

Tableau 168. Table de fréquence des catégories Avortement

Catégorie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	7	25,0	10	35,7
2	11	39,3	11	39,3
3	10	35,7	7	25,0
Total	28	100	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 1 est inférieur ou égal au quartile 3, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 4 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 3.

Environ 75% de l'échantillon réalisent un nombre modéré ou faible d'avortements au recueil 1, pour environ 65% au recueil 2.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour le nombre d'actions abandonnées n'est pas significatif pour le premier recueil : $\chi^2(2) = 2,86$; $p = 0,239$ et très faiblement significatif pour le second : $\chi^2(2) = 4,77$; $p = 0,092$. L'observation des boîtes à moustaches, représentées dans la figure A90 en annexe, semble indiquer une performance en modélisation plus élevée au deuxième recueil pour les étudiants qui avortent un nombre modéré ou faible d'actions et une homogénéité des scores pour les étudiants de ces catégories. Il est possible que les étudiants obtenant des scores de modélisation plus élevés se repèrent mieux dans l'environnement du logiciel ou qu'ils aient une stratégie de modélisation plus déterminée.

23.3 Hypothèse EQMV2 : La performance est liée au nombre d'erreurs.

Nous interrogeons la relation entre performance à l'exercice de modélisation et nombre de messages d'erreur générées par la plateforme : les étudiants performant bien à l'exercice font-ils moins d'erreurs que les autres ? Le nombre de messages d'erreur a été découpé en trois catégories selon qu'il est faible, modéré ou élevé, comme décrit chapitre 17. Leur distribution est décrite dans le tableau 169.

Tableau 169. Table de fréquence des catégories Erreurs

Catégorie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	5	17,9	5	17,9
2	16	57,1	9	32,1
3	7	25,0	14	50,0
Total	28	100	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 1 est inférieur ou égal au quartile 1, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 4 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 3.

Environ 75% de l'échantillon réalisent un nombre modéré ou faible d'erreurs, pour 82% au second recueil.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour le nombre de messages d'erreur n'est pas significatif pour le premier recueil : $\chi^2(2) = 2,65$; $p = 0,265$ et très faiblement significatif pour le second : $\chi^2(2) = 5,28$; $p = 0,071$. L'observation des boîtes à moustaches, représentées dans la figure A91 en annexe, semble indiquer une performance en modélisation plus élevée au deuxième recueil pour les étudiants qui génèrent un nombre modéré ou faible de messages d'erreur. Les étudiants qui performant le mieux produisent moins de situations dans lesquelles la pièce est sur-contrainte et/ou maîtrisent le mieux les extrusions.

23.4 Hypothèse EQMV3 : La performance est liée à la capacité à factoriser certaines actions.

Nous nous interrogeons sur la relation entre performance à l'exercice de modélisation et capacité à regrouper les actions de même nature en une séquence d'actions successives similaires, e.g. création de 4 cercles successifs : les étudiants performant bien à l'exercice de modélisation regroupent-ils les actions similaires ? Le nombre d'actions factorisées a été découpé en trois catégories selon qu'il est faible, modéré ou élevé, comme décrit chapitre 17. Leur distribution est décrite dans le tableau 170.

Tableau 170. Table de fréquence des catégories Factorisation

Catégorie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	7	25,0	2	7,1
2	14	50,0	14	50,0
3	7	25,0	12	42,9
Total	28	100	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 1 est inférieur ou égal au quartile 1, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 4 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 3.

75% de l'échantillon réalisent un nombre modéré ou faible d'actions factorisées, pour 93% au second recueil.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour la capacité à regrouper les actions n'est significatif ni pour le premier recueil : $\chi^2(2) = 2,55$; $p = 0,280$, ni pour le second recueil : $\chi^2(2) = 1,51$; $p = 0,470$. Nous ne pouvons pas mettre en évidence de lien entre capacité à regrouper des actions similaires et performance à l'exercice de modélisation.

23.5 Hypothèse EQMV 4 : La performance est liée au nombre d'actions.

Nous interrogeons la relation entre performance à l'exercice de modélisation et nombres d'actions nécessaires pour réaliser la pièce : les étudiants performant bien à l'exercice de modélisation produisent-ils moins d'actions ? Le nombre d'actions a été découpé en trois catégories selon qu'il est faible, modéré ou élevé, comme décrit chapitre 17. Leur distribution est décrite dans le tableau 171.

Tableau 171. Table de fréquence des catégories Nombre d'actions

Catégorie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	7	25,0	2	7,1
2	14	50,0	15	53,6
3	7	25,0	11	39,3
Total	28	100	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 1 est inférieur ou égal au quartile 1, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 4 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 3.

75% de l'échantillon réalisent un nombre modéré ou faible d'actions, pour 93% au second recueil.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour le nombre d'actions n'est significatif ni pour le premier recueil : $\chi^2(2) = 1,84$; $p = 0,399$, ni pour le second recueil : $\chi^2(2) = 3,66$; $p = 0,161$. La performance en modélisation n'est pas liée au nombre d'actions.

23.6 Hypothèse EQMV 5 : La performance est liée au temps de réalisation.

Nous souhaitons savoir s'il existe une relation entre performance à l'exercice de modélisation et temps de réalisation : les étudiants performant bien à l'exercice de modélisation sont-ils plus rapides ? Le temps de réalisation a été découpé en trois catégories selon qu'il est faible, modéré ou élevé, comme décrit chapitre 17. Leur distribution est décrite dans le tableau 172.

Tableau 172. Table de fréquence des catégories Temps de réalisation

Catégorie	Recueil 1		Recueil 2	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	7	25,0	3	10,7
2	14	50,0	12	42,9
3	7	25,0	13	46,4
Total	28	100	28	100

Légende. *n* = nombre d'étudiants par catégorie, % = pourcentage d'étudiants par catégorie.

Les catégories s'appuient sur les quartiles de la distribution du recueil 1 : l'indice de la catégorie 1 est inférieur ou égal au quartile 1, l'indice de la catégorie 2 est supérieur au quartile 1 et inférieur ou égal au quartile 4 et l'indice de la catégorie 3 est supérieur au quartile 3.

75% de l'échantillon réalisent l'exercice en un temps modéré ou faible, pour 89% au second recueil.

Le résultat du test de Kruskal-Wallis pour le temps de réalisation n'est significatif ni pour le premier recueil : $\chi^2(2) = 3,21$; $p = 0,201$, ni pour le second recueil : $\chi^2(2) = 3,99$; $p = 0,136$. La performance en modélisation n'est pas liée au temps de réalisation.

23.7 Hypothèse EQMV6 : Les scores de l'exercice de modélisation ont progressé significativement entre les deux prises de données.

Parmi les enseignements reçus au premier semestre, les étudiants ont reçu une formation de prise en main du logiciel de modélisation CATIA. La pratique de la modélisation, au travers d'un modèleur différent de celui utilisé dans notre expérimentation, a-t-elle été suivie une évolution de la performance en modélisation ?

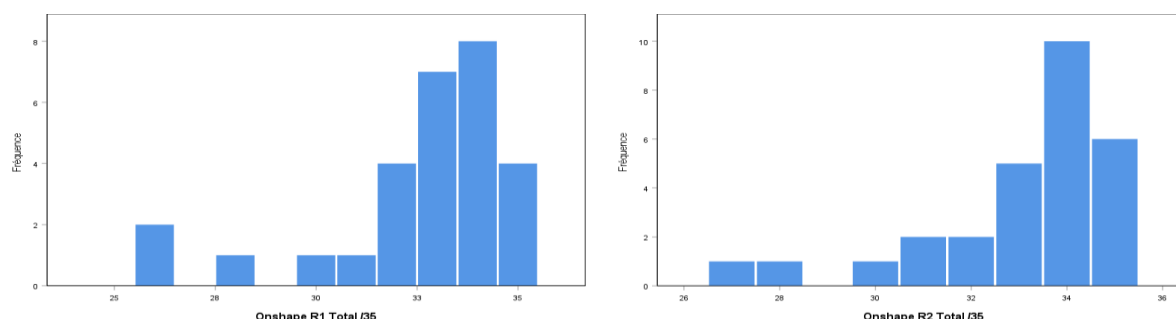
Le résultat du test du signe n'est pas significatif : $p = 0,332$. L'échantillon retenu pour l'encodage des vidéos n'a pas évolué significativement au second recueil. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les résultats de ce groupe étaient élevés à la première prise de données, laissant peu de marge de progression. Le tableau des statistiques descriptives 173 indique des moyennes, médianes et écart-types proches aux deux recueils. La figure 79 illustre des distributions proches.

Tableau 173. Statistiques descriptives des scores de modélisation des recueils 1 et 2

Recueil	<i>N</i>	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
1	28	32,57	33,00	26	35	2,426
2	28	33,07	34,00	27	35	2,054

Légende. *N* = nombre d'étudiants dont les vidéos ont été encodées.
Les statistiques descriptives des deux recueils sont proches.

Figure 79. Comparaison de la distribution des scores de modélisation au recueil 1 et 2 ($N = 28$)



Légende. Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation des 28 étudiants dont les vidéos ont été encodées au premier recueil ; Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation des 28 étudiants dont les vidéos ont été encodées au second recueil ; Fréquence = nombre d'étudiants par score.

Les distributions des deux recueils sont proches : les scores faibles sont étalés, et la distribution des scores élevés est proche de la normale. Néanmoins, les scores élevés, compris entre 32 et 35 au premier recueil, se resserrent autour des valeurs 33 et 35 au second recueil.

Les vingt-huit étudiants ont été choisis pour cette étude en raison du fait qu'ils avaient participé à toutes les expérimentations. Ils ont comme caractéristique commune une assiduité exemplaire. Celle-ci est peut-être due à une motivation particulière ou à un niveau de confiance en soi vis-à-vis de nos tâches expérimentales qui pourraient être liés à une performance élevée.

23.8 Hypothèse EQMV7 : Les étudiants sont plus rapides au deuxième recueil.

Les enseignements du premier semestre, dont l'apprentissage du modèleur CATIA et de stratégies de modélisation, ont-ils conduit à une réalisation plus rapide de l'exercice ?

L'observation des statistiques descriptives, décrites dans le tableau 174, orientent vers une diminution du temps de réalisation. Nous utilisons le test du signe pour vérifier la significativité de cette hypothèse.

Tableau 174. Statistiques descriptives du temps de réalisation des deux recueils

	Recueil 1	Recueil 2
Moyenne	1371,6	1019,2
Médiane	1085,0	953,0
Écart-type	630,2	424,7
Minimum	644	536
Maximum	2890	2179

Note. Le temps est exprimé en secondes.

Le temps de réalisation diminue au second recueil.

Le test du signe indique un résultat très significatif : $p = 0,005$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A92 en annexe, indique une diminution du temps de réalisation de la modélisation à la deuxième prise de données. Les étudiants réalisent leur modélisation plus vite au second recueil, malgré une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Cette amélioration peut s'expliquer par un apprentissage de stratégies de modélisation efficaces qui seraient applicables, quel que soit le modèleur utilisé.

23.9 Hypothèse EQMV 8 : Les étudiants réalisent moins d'actions au deuxième recueil.

Dans leur étude, Lang et *al.* (1991) constatent que le nombre de commandes diffère pour les novices et les experts de leur échantillon : selon cette recherche, les experts utilisent 23% moins de commandes que les novices (p. 260). Nous avons relevé le nombre d'actions réalisées par les étudiants pour réaliser la pièce demandée. Nous supposons que nos étudiants, qui ont pratiqué la modélisation entre les deux prises de données, ont acquis des connaissances procédurales qui leur permettent de réaliser la pièce en moins d'actions.

Le test du signe indique un résultat faiblement significatif : $p = 0,089$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A93 en annexe, indique une diminution du nombre d'actions à la deuxième prise de données. Les étudiants réalisent leur modélisation en moins d'actions au second recueil, malgré une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Il est possible que la pratique du modèleur volumique CATIA leur ait permis d'acquérir des stratégies de modélisation, i.e. des connaissances procédurales, plus économes en actions, transférables à la plateforme Onshape.

23.10 Hypothèse EQMV 9 : Les étudiants sont plus efficaces au deuxième recueil.

L'efficacité est déterminée en divisant le temps de réalisation par le nombre d'actions effectuées. Le test du signe comparant l'efficacité du recueil 1 et celle du recueil 2 indique un résultat non significatif : $p = 0,186$. Malgré une diminution significative du temps de réalisation et une diminution faiblement significative du nombre d'actions, les étudiants ne sont pas plus efficaces au deuxième recueil qu'au premier.

23.11 Hypothèse EQMV 10 : Les étudiants tâtonnent plus au deuxième recueil.

Nous souhaitons expliquer l'absence d'évolution de l'efficacité des étudiants au second recueil. L'indicateur Tâtonnement nous renseigne sur les actions des étudiants pour lesquelles nous observons des déplacements sans but précis, ainsi que des explorations de menus. Notre expérimentation utilise la plateforme Onshape alors que les étudiants ont été formés à utiliser le logiciel CATIA entre les deux prises de données. Nous faisons l'hypothèse que l'apprentissage de CATIA et de son environnement de travail a créé des habitudes chez les étudiants, notamment concernant les icônes et les emplacements des fonctions disponibles dans le logiciel, c'est-à-dire des connaissances déclaratives. L'absence de pratique d'Onshape entre les deux recueils n'aurait pas permis le même ancrage.

Le test du signe indique un résultat significatif : $p = 0,031$. L'observation des boîtes à moustaches, illustrées dans la figure A94 en annexe, indique une augmentation d'actions de tâtonnement à la deuxième prise de données. Les étudiants réalisent significativement plus de déplacements sans but précis et d'exploration de menu au second recueil, après une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Les échanges et des commentaires à voix haute dans les vidéos du second recueil incluent des remarques dans lesquelles les étudiants expriment un manque de familiarité avec la plateforme Onshape : e.g. « Ah, je préfère CATIA », « Comment ça tourne ce machin ? ». Nous suggérons que l'augmentation des tâtonnements est due à une diminution des connaissances déclaratives relatives à Onshape, c'est-à-dire spécifiques à ce modèleur, entre les deux prises de données.

23.12 Récapitulatif des résultats de ce chapitre

Code	Hypothèse	Résultat
EQMV1	La performance est liée au nombre d'actions avortées.	<ul style="list-style-type: none">• Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation liée au nombre d'actions avortées au premier recueil.• Il existe une différence performance en modélisation au recueil 2 faiblement significative favorable aux étudiants qui avortent moins d'actions.
EQMV2	La performance est liée au nombre de messages d'erreurs.	<ul style="list-style-type: none">• Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation liée au nombre de messages d'erreur au premier recueil.• Il existe une différence de performance en modélisation au recueil 2 faiblement significative favorable aux étudiants qui génèrent moins de messages d'erreur.
EQMV3	La performance est liée à la capacité à factoriser certaines actions.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en

		modélisation liée à la capacité à regrouper des actions similaires.
EQMV4	La performance est liée au nombre d'actions.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation liée au nombre d'actions.
EQMV 5	La performance est liée au temps de réalisation.	Nous ne pouvons pas mettre en évidence de différence de performance en modélisation liée au temps de réalisation.
EQMV6	Les scores de l'exercice de modélisation ont progressé significativement à la deuxième prise de données.	Les scores des étudiants de notre échantillon restreint n'ont pas évolué significativement entre les deux prises de performance.
EQMV7	Les étudiants sont plus rapides au deuxième recueil.	Les étudiants de notre échantillon restreint sont significativement plus rapides à la deuxième prise de données.
EQMV8	Les étudiants réalisent moins d'actions au deuxième recueil.	Le nombre d'actions du second recueil est significativement plus faible que celui du premier recueil, cette significativité étant faible.
EQMV9	Les étudiants sont plus efficaces au deuxième recueil.	Les étudiants de notre échantillon restreint ne sont pas plus efficaces au second recueil.
EQMV10	Les étudiants tâtonnent plus au deuxième recueil.	Les étudiants de notre échantillon restreint tâtonnent significativement plus au second recueil.

23.13 Synthèse des résultats de ce chapitre

Tableau 175. Récapitulatif des résultats des hypothèses EQMV

Variable		Résultat du recueil 1	Résultat du recueil 2
Stratégies	Nombre d'actions	NS	NS
	Nombre d'actions avortées	NS	Très faiblement significatif
	Nombre d'actions factorisées	NS	NS
Performance	Nombre de messages d'erreur	NS	Très faiblement significatif
	Temps de réalisation	NS	NS
Variable		Évolution	
Stratégies	Tâtonnements	Augmentation significative	
Performance	Exactitude	NS	
	Temps de réalisation	Diminution très significative	
	Nombre d'actions	Diminution très faiblement significative	
	Efficacité	NS	

Légende. NS = résultat non significatif.

Nous pouvons voir à partir des résultats regroupés dans le tableau 175 que :

- l'absence d'évolution significative de la justesse de modélisation de l'échantillon restreint confirme qu'il n'est pas représentatif de l'échantillon complet, qui a progressé significativement au second recueil.
- Les indicateurs de performance Nombre d'actions et Temps de réalisation ne sont pas liés à l'indicateur de performance Justesse de la réalisation. On peut en conclure que la qualité de la réalisation peut être atteinte plus ou moins rapidement, grâce à un nombre élevé ou faible d'actions. Ceci suggère que différentes stratégies, plus au moins économes, permettent de réaliser la pièce correctement.
- On constate une réduction significative du temps de réalisation et faiblement significative du nombre d'actions. L'efficacité ne progresse pourtant pas. L'augmentation significative du nombre d'occurrences des tâtonnements offre une piste pour expliquer ce manque de gain en efficacité : le nombre d'actions, dont la diminution n'est que faiblement significative, est-il affecté par l'augmentation des tâtonnements ? Il peut être révélateur d'un manque de familiarité avec la plateforme Onshape, que les étudiants n'ont pas utilisé pendant plusieurs mois, au profit de la pratique d'un autre modèleur : ceci révèle un manque de connaissances spécifiques au modèleur, c'est-à-dire des connaissances déclaratives.
- Nous n'observons pas de différence significative dans la performance de cet échantillon restreint concernant les stratégies de planification d'activité, telle que relevée au travers de l'indicateur nombre d'actions avortées, au premier recueil. Ceci suggère à nouveau que différentes stratégies plus au moins économes permettent de réaliser la pièce correctement.
- Ceci est confirmé par le fait que la stratégie de regroupement des actions n'a pas d'effet sur la performance en modélisation de notre échantillon restreint : il semblerait que les étudiants performant aussi bien qu'ils regroupent les actions de même nature ou qu'ils les dispersent aux moments qu'ils jugent opportuns.
- Nous constatons une relation faiblement significative entre la performance en modélisation, telle qu'évaluée au travers des critères de justesse de la réalisation, et le nombre d'actions avortées au recueil 2 : les étudiants obtenant les meilleurs scores abandonnent moins d'actions. Ce résultat suggère que les étudiants obtenant les meilleurs scores ont une meilleure planification de l'activité de modélisation.
- De même, nous constatons une relation faiblement significative entre la performance en modélisation, telle qu'évaluée au travers des critères de justesse de la réalisation, et le nombre de messages d'erreur au second recueil : les étudiants obtenant les meilleurs scores produisent moins de messages d'erreur. Ce résultat suggère que les étudiants obtenant les meilleurs scores sont aussi ceux qui ne créent pas ou moins de situations de sur-contrainte et d'erreur liées à l'extrusion au cours de leur modélisation.
- L'absence de résultat significatif au premier recueil laisse penser que la planification de l'activité et la capacité à ne pas créer de situations générant des messages d'erreur sont plus déterminantes au deuxième recueil et expliquent en partie les différences de performance. Ces indicateurs relèvent aussi bien des connaissances déclaratives que des connaissances procédurales :
 - les situations de sur-contrainte indiquent un manque de connaissance de l'objet à concevoir, e.g. relations géométriques constituant l'objet (connaissances déclaratives) ;
 - les erreurs relatives aux extrusions peuvent relever du manque de maîtrise du modèleur volumique (connaissances déclaratives) ou d'une mauvaise compréhension du principe de l'extrusion (connaissances déclaratives) ;
 - la planification de l'activité relève de la stratégie de modélisation (connaissances procédurales).

- Les deux résultats liant la performance au nombre de messages d'erreur et au nombre d'actions avortées est en faveur des étudiants générant le moins de messages d'erreur et d'abandons d'actions. Ce résultat étant caractéristiques du deuxième recueil, après que les étudiants ont suivi une formation à la modélisation au travers de l'apprentissage du modèleur CATIA, semble indiquer une transférabilité de certaines connaissances acquises lors de l'apprentissage d'un modèleur volumique à un autre.

Chapitre 24. Discussion des résultats

Dans ce chapitre, nous discutons les résultats obtenus à l'issue de nos traitements, tout d'abord en les confrontant à notre revue de littérature chaque fois que possible, puis en proposant nos interprétations, en lien avec les particularités de notre terrain et de nos expérimentations. Nous abordons dans un premier temps les résultats relatifs à la performance spatiale et à la performance en modélisation. Nous discutons ensuite de l'évolution de l'habileté spatiale et de la performance en modélisation à l'issue du premier semestre d'enseignements reçus à ISAE-Supméca. Finalement, nous abordons l'étude qualitative que nous avons effectuée à partir de l'encodage des vidéos de modélisation d'un échantillon restreint de 28 étudiants ayant participé aux deux recueils.

24.1 Lien entre performance aux tests spatiaux et caractéristiques individuelles

La première partie de nos expérimentations et de nos traitements visent à caractériser et à expliquer la performance spatiale d'étudiants à leur arrivée en première années d'études d'ingénieurs à ISAE-Supméca. Notre échantillon obtient des scores majoritairement moyens et élevés aux tests de visualisation spatiale et de changement de point de vue et normalement distribués au test de dissociation. Nous allons dans un premier temps discuter les résultats obtenus pour les variables extrinsèques, c'est-à-dire les caractéristiques sociodémographiques et relatives à la formation antérieure de notre échantillon, puis les variables intrinsèques, soit les stratégies mobilisées dans la résolution des tâches présentées dans les tests spatiaux.

24.1.1 Variables extrinsèques

24.1.1.1 Loisirs

De manière à identifier des pistes d'explication d'éventuelles différences de performance aux tests spatiaux, nous avons interrogé les étudiants sur leurs loisirs. Nos résultats établissent un lien entre certaines catégories de loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et performance aux tests spatiaux :

- loisirs dynamiques : R PSVT:R1 ($\chi^2(15) = 30,61$; $p = 0,010$), MRT1 ($\chi^2(15) = 30,53$; $p = 0,010$), MCT1 ($\chi^2(15) = 25,65$; $p = 0,042$) ;
- loisirs manipulatoires : R PSVT:R1 ($\chi^2(18) = 29,70$; $p = 0,040$), MRT1 ($\chi^2(18) = 35,42$; $p = 0,008$), MCT1 ($\chi^2(18) = 29,70$; $p = 0,040$), PSVT:V1 : ($\chi^2(18) = 30,92$; $p = 0,029$) ;
- loisirs en 2D : CFT1 ($F(6,139) = 2,60$; $p = 0,020$) ;
- loisirs avec construction 3D : CFT1 ($F(6,139) = 2,37$; $p = 0,033$) ; MCT1 ($\chi^2(6) = 17,32$; $p = 0,008$).

Ces résultats suggèrent que les étudiants obtenant les meilleurs scores à ces tests sont caractérisés par une pratique modérée ou élevée de loisirs dynamiques, manipulatoires, en 2D et/ou de construction 3D dans l'enfance et l'adolescence. La performance spatiale, telle que nous l'avons mesurée, n'est pas liée à la pratique de loisirs artistiques dans l'enfance. Il semblerait que la performance spatiale élevée de notre échantillon soit accompagnée d'une pratique modérément et fortement fréquente de certains loisirs dans l'enfance et l'adolescence.

Nous obtenons des résultats significatifs pour la pratique de loisirs à l'âge adulte. Cependant la nature de nos données rend l'interprétation de certains de ces résultats difficile. Seul le lien

entre performance au R PSVT:R1 et catégories pratique de loisirs dynamiques semble indiquer une meilleure performance à ce test de rotation mentale pour les catégories d'étudiants pratiquant un nombre élevé de loisirs dynamiques à l'âge adulte. Il se peut que les loisirs que nous avons proposés dans notre liste ne correspondent pas aux pratiques de notre échantillon ou que la pratique de loisirs soit plus bénéfique à développer l'habileté spatiale dans l'enfance et l'adolescence.

La revue de littérature établit des liens entre habileté spatiale et pratique de loisirs. L'étude de Gold *et al.* (2018) a investigué le lien entre habileté spatiale et loisirs. Leur questionnaire interroge leurs sujets, étudiants en géologie, sur leur pratique des jeux de construction 3D dans l'enfance, leur pratique passée et/ou présente des jeux vidéo et les sports qu'ils ont pratiqués toute leur vie (p. 4-5). Les auteurs trouvent un lien significatif entre performance spatiale (mesure combinant les résultats d'un test de rotation mentale, d'un test de transformation mentale et d'un test de dissociation) et pratique de jeux vidéo d'action et de jeux de construction 3D (p. 10). En revanche, ils ne trouvent pas de lien avec les sports, déclarés par les étudiants, qu'ils traitent individuellement. Dans leur recherche, Feng, Spence et Pratt (2007) mesurent l'efficacité d'un dispositif pédagogique visant à améliorer la rotation mentale d'étudiants à l'aide d'un programme de dix heures de pratique d'un jeu vidéo d'action en 3D et d'un jeu vidéo 3D : ils observent que seuls les sujets ayant pratiqué le jeu vidéo d'action progressent au MRT (p. 853). Moreau *et al.* (2012) trouvent que des étudiants pratiquant dix mois de lutte progressent au MRT, à la différence du groupe qui pratique la course pendant dix mois (p.86).

Nos catégories regroupent différentes activités : ainsi la catégorie dynamique regroupe les loisirs à déplacement réel et virtuel, c'est-à-dire les sports listés dans notre questionnaire, les échecs et les jeux vidéo d'action en 3D. Nos méthodologies de recueil et de traitement des données étant différentes de celles des études précédemment citées, il est difficile de confirmer nos résultats à l'aide de ces recherches. Ils décrivent cependant une même relation liant pratique de certains loisirs et habileté spatiale.

24.1.1.2 Genre

Une autre source de différence de performance aux tests spatiaux décrite dans la littérature (Albaret et Aubert, 1996; Bodner et Guay, 1997; Maeda et Yoon, 2013; McGee, 1979) est le genre. Nos expérimentations ont mis en évidence une différence de performance liée au genre en faveur des hommes concernant le PSVT:V1 ($U = 2077,0$; $p = 0,010$) et en faveur des femmes pour le CFT1 ($t(144) = -2,36$; $p = 0,010$). Les études de notre revue de littérature utilisant ces tests (Butler *et al.*, 2010; Onyancha *et al.*, 2009) n'adressent pas la question du genre. L'étude de Gold *et al.* (2018) utilise le test de dissociation *Hidden Figures Test* et ne trouve pas de différence liée au genre pour ce test (p. 7).

Nous n'avons pas trouvé de différence significative liée au genre pour les tests de visualisation spatiale. La majorité des études portant sur l'habileté spatiale (Agbanglanon, 2019, p. 95; Albaret et Aubert, 1996, p. 272; G. Bodner et Guay, 1997, p. 12; Górska, 2005, p. 203; Maeda et Yoon, 2013, p. 87) utilisent des tests visant à mesurer la visualisation spatiale et montrent un résultat favorables aux hommes à l'exception de l'étude d'Agbanglanon (2019), qui ne trouve pas de différence de performance liée au genre. Les sujets de cet auteur sont des étudiants spécialisés en conception et en outils de CAO en deuxième année de Brevet de Technicien Supérieur Électromécanique (p. 69). Les étudiants de notre échantillon sont issus majoritairement de classes préparatoires et ont été sélectionnés pour accéder à ces formations, puis aux études d'ingénieurs. Nous suggérons que les femmes engagées dans ces études à

composant CAO ont des profils particuliers qui expliquent une habileté spatiale proche de celle des hommes. Albaret et Aubert (1996) constatent que c'est le cas pour les lycéennes de la filière scientifique de leur étude, dont les scores au MRT sont plus élevés que ceux des lycéennes dans les autres filières (p. 272). L'absence de significativité de ce résultat pourrait être aussi expliquée par le faible effectif de femmes dans notre échantillon ($N_F = 37$ [18,75%] femmes et $N_H = 117$ [81,25%] hommes).

24.1.1.3 Prévalence manuelle

Les études de Guay et McDaniel et Somers *et al.* (1978, p. 96; 2015, p. 41) ont investigué la relation entre prévalence manuelle et performance spatiale. Elles ont montré une performance significativement supérieure pour les droitiers au PSVT:V et au MRT pour la première étude et une supériorité faible mais significative des droitiers dans les tests spatiaux, et plus particulièrement le MRT, pour la seconde. Ces deux études ne tiennent pas en compte les ambidextres. Nos résultats ne mettent pas en évidence de lien significatif entre performance spatiale et prévalence manuelle. Il se peut que notre découpage (droitier, gaucher, ambidextre) ait mené à des effectifs trop faibles pour établir des résultats similaires.

24.1.1.4 Nombre langues maternelles

Autre caractéristique individuelle, le nombre de langues maternelles apprises dans l'enfance. Nos résultats indiquent un lien entre nombre de langues maternelles apprises et performance au PSVT:V1 ($U = 963,00$; $p = 0,053$), au R PSVT:R1 ($U = 853,0$; $p = 0,009$) et au MCT1 ($U = 971,5$; $p = 0,055$) en faveur des étudiants ayant appris une langue maternelle. Cette relation n'a pas été traitée dans notre revue de littérature. Une analyse du lien entre le nombre de langues maternelles apprises et des lieux d'étude avant de rejoindre ISAE-Supméca permettrait d'investiguer le lien entre performance à ces tests et spécificités nationales des formations.

24.1.1.5 Contenu technologique de la formation post-bac

Nos étudiants sont issus de formations scientifiques à contenus technologiques pour certains et exemptes de contenus technologiques pour d'autres. L'étude de Gold *et al.* (2018) investigate le lien entre performance spatiale et spécialisation en STIM et trouvent des résultats favorables aux étudiants spécialisés en STIM (p. 9). En revanche, ils ne trouvent pas de corrélation entre formation en ingénierie et performance spatiale (p. 10). Nos résultats n'indiquent pas de lien significatif entre performance aux tests de visualisation spatiale et enseignements technologiques, ce qui correspond aux résultats de Gold *et al.*

24.1.1.6 Pratique de logiciels de modélisation

Autre indicateur de la formation reçue par les étudiants avant de rejoindre l'école, la pratique des modeleurs volumiques. Nous avons mis en évidence un lien entre pratique de logiciels de modélisation volumique et performance au R PSVT:R1 ($U = 1638,5$; $p = 0,030$) et au MCT1 ($U = 1753,0$; $p = 0,005$) favorables aux étudiants avec expérience des modeleurs. Ces résultats peuvent être rapprochés de l'étude de Górska et Sorby (1998, cité dans Sorby, 1999b, p. 4.465.2) établissant l'efficacité de cours de CAO sur la progression au MCT. Nous n'obtenons pas de résultat significatif pour le MRT ($U = 1416,0$; $p = 0,372$), il nous faudrait vérifier la moyenne prétest de notre échantillon d'étudiants ayant pratiqué les modeleurs volumiques pour

identifier d'éventuelles différences avec celui de l'étude de Górski et Sorby. Nos résultats confirment cependant ceux de cette étude en ce qui concerne le MCT et peuvent être rapprochés des résultats concernant le PSVT:R, qui est la version originale du R PSVT:R.

Nous avons aussi constaté un lien entre le nombre de logiciels pratiqués et la performance au R PSVT:R1 ($\chi^2(4) = 9,48$; $p = 0,050$) et au MCT1 ($\chi^2(4) = 9,89$; $p = 0,042$). Nos résultats suggèrent que la pratique des modeleurs volumiques permet de développer des compétences spatiales ou que les étudiants ayant utilisé les modeleurs volumiques ont de bonnes compétences spatiales.

24.1.1.7 Niveau d'anglais

Nous avons choisi la variable niveau d'anglais à l'entrée à l'école parce que la plateforme Onshape n'était disponible qu'en anglais au moment de notre expérimentation. Nous avons aussi choisi de l'exploiter pour étudier le lien qu'elle pourrait entretenir avec l'habileté spatiale, en l'absence de littérature interrogeant cette relation. Nos résultats n'indiquent pas de lien entre niveau d'anglais et performance spatiale.

24.1.2 Variables intrinsèques

24.1.2.1 Recours à plusieurs stratégies de résolution

Comme décrit au chapitre 6, la revue de littérature dévolue à l'étude des stratégies mobilisées dans les tests spatiaux (Albaret et Aubert, 1996; Barratt, 1953; P. E. Eme et Marquer, 1998; Hegarty, 2018; Just et Carpenter, 1984; Lohman et Kyllonen, 1983; Pilardeau, 2008) montre que plusieurs méthodes de résolution sont adoptées par les sujets lorsqu'ils répondent aux questions posées dans les tests spatiaux. Notre méthode a pour but d'explorer la différence entre tâche prescrite dans les instructions des tests spatiaux et activité dans la résolution des problèmes présentés dans ces tests au travers de deux outils d'investigation : les questionnaires ouverts Stratégies et les QCM Stratégies.

L'analyse et l'encodage des verbatim produits par les questionnaires ouverts Stratégies a montré qu'il existe plusieurs stratégies pour résoudre les tests spatiaux : celles-ci sont constituées d'une stratégie qui se suffit ou d'une séquence de stratégies. Au premier recueil, nous relevons quinze stratégies différentes pour le PSVT:V1, neuf pour le R PSVT:R1, dix-sept pour le MRT1, vingt-neuf pour le MCT1 et dix-neuf pour le CFT1.

Ce résultat est confirmé par l'analyse des réponses aux QCM stratégies qui montrent que :

- 67% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le PSVT:V1 ;
- 67% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le R PSVT:R1 ;
- 60% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le MRT1 ;
- 58% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le MCT1 ;
- 35,5% des étudiants déclarent mobiliser plusieurs stratégies uniques ou faisant partie d'une séquence pour le CFT1.

24.1.2.2 Nombre de stratégies de résolution adoptées

Nous avons souhaité approfondir ce résultat en vérifiant si le nombre de stratégies mobilisées étaient lié à la performance spatiale. Nous obtenons un résultat significatif pour le MCT1 ($\chi^2(2) = 9,15$; $p = 0,010$) en faveur des étudiants déclarant mobiliser deux stratégies sur les étudiants déclarant en mobiliser une ou trois. Nous obtenons aussi un résultat très significatif pour le nombre de stratégies et la performance au CFT1 ($F(2,143) = 6,81$; $p = 0,001$) qui montre que la performance des étudiants croît avec l'augmentation du nombre de stratégies déclarées mobilisées. Ceci suggère que plusieurs stratégies sont nécessaires pour résoudre le MCT et le CFT. Cela confirme en partie les résultats de Tsutsumi, Shiina, Suzuki, Yamanouchi, Saito et Suzuki (1999) qui avancent que certaines questions du MCT nécessitent non seulement la capacité à manipuler une image mentale mais aussi celle à identifier les mesures de l'objet (e.g. longueur des côtés) (p. 117). Ces résultats ne sont pas répliqués dans l'analyse des verbatim. À la différence des QCM Stratégies, les questionnaires ouverts Stratégies demandent aux étudiants de décrire les processus de résolution adoptés pour répondre à trois questions de chaque test. Ceci nous a permis d'identifier plusieurs briques constituant une séquence dans le cas de verbatim, alors que les QCM ne permettent pas de déterminer si les stratégies sélectionnées par les étudiants sont autonomes ou constituantes d'une séquence. Nous ne pouvons donc pas conclure si ces résultats se confortent ou se contredisent.

24.1.2.3 Combinaisons de stratégies adoptées

Nous obtenons un résultat significatif liant combinaison de stratégies et performance pour le MCT1 ($\chi^2(6) = 14,44$; $p = 0,025$) et le CFT1 ($F(6,139) = 4,49$; $p < 0,001$). Dans le cas du MCT1, ce sont les étudiants adoptant les combinaisons QCMU (transformation mentale et prise en compte des mesures) qui performant significativement mieux que les étudiants déclarant mobiliser la stratégie QCMV (transformation mentale). Ce résultat confirme à nouveau les résultats de Tsutsumi *et al.* (1999) qui avancent que certaines questions du MCT nécessitent la capacité à manipuler une image mentale et celle à identifier les mesures de l'objet (p. 117). En ce qui concerne le CFT1, c'est le groupe des étudiants adoptant la combinaison QCMD (Autre stratégie- Rotation mentale – Une partie d'un tout) qui obtiennent la meilleure performance. Ce résultat suggère que les étudiants qui déplacent la forme, la cherchent et qui utilisent une autre stratégie résolvent le mieux ces problèmes. Nous ne pouvons cependant dire, s'ils utilisent ces stratégies en séquence, de manière isolée ou s'ils changent de stratégie d'une question à une autre.

24.1.2.4 Changement de stratégie

La comparaison des séquences ou stratégies autonomes déclarées mobilisées dans les verbatim produits par les questionnaires ouverts Stratégies permet d'identifier si les stratégies adoptées pour trois questions de chaque test sont les mêmes pour les trois questions. Il en ressort que :

- environ 53% des étudiants déclarent mobiliser des stratégies différentes pour le PSVT:V1 ;
- environ 32% des étudiants déclarent mobiliser des stratégies différentes pour le R PSVT:R1 ;
- environ 33% des étudiants déclarent mobiliser des stratégies différentes pour le MRT1 ;
- environ 62% des étudiants déclarent mobiliser des stratégies différentes pour le MCT1 ;

- environ 37,5% des étudiants déclarent mobiliser des stratégies différentes pour le CFT1.

Ce résultat est conforme aux travaux de Kyllonen (Kyllonen *et al.*, 1981, p. 8; Lohman et Kyllonen, 1983, p. 127), d'Eme et Marquer (1998, p. 472) et de Pilardeau (2008, p. 86), qui ont montré que les sujets changeaient de stratégie d'une question à une autre dans un test spatial.

Ce résultat peut expliquer l'absence de résultat pour l'étude de la relation entre stratégies spécifiques identifiées dans les verbatim et performance aux tests : le fait que les étudiants changent de stratégie au cours d'un test, en abandonnant par exemple une stratégie au profit d'une autre selon le problème présenté (Kyllonen *et al.*, 1981, p. 9).

24.1.2.5 *Changement de stratégie et performance*

Ce changement de stratégie est-il bénéfique à la performance ? Nous obtenons un résultat significatif pour le MCT1 ($U = 2636,5$; $p = 0,028$) et un résultat faiblement significatif pour le CFT1 ($t(138) = -1,498$; $p = 0,053$) et le MRT1 ($U = 2549,50$; $p = 0,050$). Ces résultats confirment les travaux de Lohman et Kyllonen (1983) qui observent que les sujets de leur expérimentation qui changent de mode d'assemblage de formes obtiennent les meilleures performances à cette tâche et à des tests spatiaux (p. 129). Pour trois de nos tests, la flexibilité stratégique est bénéfique à la performance spatiale.

24.1.3 *Synthèse*

Nous regroupons les résultats des hypothèses dans le tableau 176 pour tenter de dessiner un portrait des caractéristiques des tests spatiaux que nous avons testés à partir des variables que nous avons testées sur notre échantillon.

Tableau 176. Caractéristiques des cinq tests spatiaux

Catégorie	Variable	Visualisation spatiale			Orientation spatiale	
		R PSVT:R	MRT	MCT	PSVT:V	CFT
Sociodémographique	Genre	✗	✗	✗	Hommes >	Femmes >
	<i>N</i> langues maternelles	1 > 2	✗	1 > 2	1 > 2	✗
	Prévalence manuelle	✗	✗	✗	✗	✗
Formation	TOEIC	✗	✗	✗	✗	✗
	Formation	✗	✗	✗	✗	✗
	Pratique modeleurs	Avec pratique >	✗	Avec pratique >	✗	✗
	<i>N</i> modeleurs	Croissant avec <i>N</i>	✗	Croissant avec <i>N</i>	✗	✗
Loisirs – enfance et adolescence	dynamiques	✓	✓	✓	✗	✗
	manipulatoires	✓	✓	✓	✓	✗
	2D	✗	✗	✗	✗	✓
	construction	✗	✗	✗	✗	✓
	artistiques	✗	✗	✗	✗	✗
Loisirs – âge adulte	dynamiques	✓	✗	✗	✗	✓
	manipulatoires	✓	✗	✗	✗	✗
	2D	✗	✗	✗	✗	✗
	construction	✗	✗	✗	✓	✓
	artistiques	✗	✗	✗	✗	✗
Stratégie	<i>N</i> > 1	✓	✓	✓	✓	✓
	Changement	✓	✓	✓	✓	✓
Efficacité stratégie	Combinaison	✗	✗	✓	✗	✓
	<i>N</i> stratégies (QCM)	✗	✗	2	✗	> 1
	Changement	✗	✓	✓	✗	✓

Légende. *N* = nombre ; > 1 = supérieur à 1 ; 1 > 2 = meilleure performance pour les étudiants ayant appris une langue maternelle que ceux en ayant appris deux ; Hommes > = meilleure performance des hommes ; Avec pratique > = meilleure performance pour les étudiants avec pratique des modeleurs volumiques ; ✗ = absence de résultat significatif ; ✓ = présence d'un résultat significatif.

Nos résultats semblent indiquer que le R PSVT:R, test visant à évaluer la rotation mentale, est mieux réussi par les étudiants ayant pratiqué les modeleurs volumiques et/ou régulièrement des loisirs dynamiques et manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. Ces apprentissages impliquent des rotations, qu'elles soient réelles ou virtuelles, d'artefacts ou du corps. Ce test mobilise plusieurs stratégies, mais dans des proportions moindres que le PSVT:V, le MRT et le MCT. Ceci explique peut-être que ni le changement de stratégie, ni le nombre de stratégies ne semble être lié à la performance à ce test. De plus, aucune combinaison particulière ne semble être plus efficace qu'une autre.

Le MRT, test visant à évaluer la rotation mentale, est mieux réussi par les étudiants ayant pratiqué régulièrement des loisirs dynamiques et manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. Ces loisirs impliquent des rotations, qu'elles soient réelles ou virtuelles, d'artefacts ou du corps. La flexibilité stratégique pour répondre aux questions qui y sont présentées permet d'obtenir des scores plus élevés que le recours à une stratégie unique.

Le MCT, test visant à évaluer la transformation mentale, est mieux réussi par les étudiants ayant pratiqué régulièrement des loisirs dynamiques, manipulatoires et de construction 3D dans l'enfance et l'adolescence. Ces loisirs impliquent des modifications, qu'elles soient réelles ou virtuelles, de parties d'artefacts ou du corps. De même que le MRT, la flexibilité stratégique pour répondre aux questions qui y sont présentées permet d'obtenir des scores plus élevés que le recours à une stratégie unique. Les deux stratégies qui sont plus efficaces pour résoudre les problèmes qui y sont présentés contiennent la transformation mentale. Les étudiants combinant cette stratégie avec la prise en compte des mesures obtiennent cependant la meilleure performance.

Le PSVT:V, test visant à évaluer la capacité à changer de point de vue, est mieux réussi par les étudiants de sexe masculin, ayant pratiqué des loisirs manipulatoires dans l'enfance. Ces deux variables sont-elles liées ? Ceci suggérerait que cette compétence s'acquiert au travers de pratiques ludiques adoptées plus fréquemment par les garçons. De même que le R PSVT:R, ce test mobilise plusieurs stratégies, cependant ni le changement de stratégie, ni le nombre de stratégies ou ni aucune combinaison particulière ne semble être lié à la performance à ce test.

Le CFT, test visant à évaluer la capacité dissocier un élément intriqué dans un motif, est mieux réussi par les étudiants de sexe féminin, et/ou ayant pratiqué des loisirs 2D et de construction 3D dans l'enfance. Le genre et la pratique des loisirs 2D et/ou de construction 3D sont-ils liés ? Ceci suggérerait que cette compétence s'acquiert au travers de pratiques ludiques adoptées plus fréquemment par les filles. Ce test mobilise plusieurs stratégies, mais dans des proportions moindres que le PSVT:V, le MRT et le MCT. De même que le MCT et le MRT, la flexibilité stratégique est liée à une meilleure performance. Une combinaison de stratégie est cependant particulièrement liée à la performance et allie rotation mentale et dissociation.

D'une manière générale, on observe que la pratique régulière dans l'enfance et l'adolescence de loisirs dynamiques, manipulatoires et de construction 3D est liée à une performance spatiale élevée. En revanche, nous n'observons pas de liens significatifs pour les loisirs artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence. D'autre part, les résultats significatifs que nous avons obtenus pour les loisirs pratiqués à l'âge adulte sont difficiles à interpréter en raison de la variabilité de nos catégories. Il se peut que nous n'ayons pas ciblé les loisirs les plus pratiqués par notre échantillon ou que les loisirs pratiqués par les étudiants (e.g. soirées entre amis, communications d'humoristes) ne contribuent pas à développer l'habileté spatiale.

On remarque aussi que la pratique de modeleurs est liée à une performance élevée à deux tests de visualisation spatiale, alors que l'apprentissage de matières technologique ne semble pas lié aux habiletés spatiales. Il se peut que la pratique des modeleurs volumiques contribue à développer l'habileté spatiale, ou bien que des étudiants à l'habileté spatiale élevée s'orientent vers des cursus comprenant l'apprentissage de la modélisation volumique.

On constate finalement que les tests spatiaux mettent en œuvre une pluralité de stratégies, qu'elles soient visées par le test ou pas, et que la performance à ces tests ne peut être seulement expliquée par la maîtrise d'une compétence unique qu'un test vise à mesurer.

24.2 Lien entre performance à un exercice de modélisation volumique et caractéristiques individuelles

La deuxième partie de nos expérimentations et de nos traitements visent à caractériser et à expliquer la performance des étudiants arrivant en première années d'études d'ingénieurs à ISAE-Supméca à un exercice de modélisation volumique. Les recherches dédiées à la performance en modélisation s'intéressent d'une part à explorer le lien qu'elle entretient avec l'habileté spatiale (Agbanglanon, 2019; Branoff, 2000; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012) et d'autre part à caractériser cette performance (Chester, 2007; Hamade *et al.*, 2005; Lang *et al.*, 1991; Rynne et Gaughran, 2007). Notre échantillon obtient des scores moyens et élevés à cette mesure. Nous allons dans un premier temps discuter les résultats obtenus pour les variables extrinsèques, c'est-à-dire la performance spatiale de notre échantillon et les caractéristiques sociodémographiques, puis les variables intrinsèques, soit les stratégies mobilisées dans la réalisation de l'exercice de modélisation.

24.2.1 Performance en modélisation et habileté spatiale

24.2.1.1 Relation entre la performance en modélisation et habileté spatiale

Les études portant sur le lien entre performance à des évaluations de modélisation et habileté spatiale de notre revue de littérature spécifiant leurs critères d'évaluation (Branoff, 2000; Steinhauer, 2012) comprennent des critères d'attaque de la pièce (première esquisse ou forme de base) (Steinhauer, 2012, p. 47), d'organisation de l'arbre de construction (Steinhauer, 2012, p. 47), de justesse des dimensions (Branoff et Dobelis, 2012b, p. 25.548.6; Steinhauer, 2012, p. 47), de respect des contraintes géométriques (Branoff et Dobelis, 2012b, p. 25.548.6; Steinhauer, 2012, p. 47), de sélection et d'ordre des commandes (Steinhauer, 2012, p. 47) et d'application de finitions cosmétiques (Branoff et Dobelis, 2012b, p. 25.548.6). Steinhauer trouve une corrélation significative entre la performance au MCT et chacune des rubriques de son évaluation. Branoff et Dobelis constatent une corrélation entre les scores du PSVT:R et le score de modélisation.

Nous mesurons la performance globale des réalisations au travers de deux indicateurs : la production des six volumes fonctionnels constitutifs de la pièce à réaliser et un score comprenant des critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels. Nous observons un résultat significatif pour la relation entre la capacité à procurer les six volumes attendus et le CFT1 ($F(6,122) = 3,59$; $p = 0,003$) : à l'exception des étudiants ayant produit deux volumes ($n = 4$), le nombre de volumes augmentent avec les scores au CFT1. Nous trouvons d'autre part de faibles corrélations significatives entre les scores de modélisation et les scores des cinq tests spatiaux de notre protocole. Ces résultats corroborent ceux de Steinhauer et ceux de Brannoff et Dobelis en ce qui concerne le lien entre performance en modélisation et visualisation spatiale. Ils montrent aussi la pertinence de mesures de l'orientation spatiale pour la performance en modélisation, et en particulier du CFT, qui est le seul test pour lequel nous trouvons un lien avec nos deux indicateurs de performance, i.e. les six volumes et l'évaluation dimensionnelle, géométrique et fonctionnelle. Ce test nécessite d'isoler une forme géométrique intriquée dans un motif géométrique complexe, compétence qui semble être utile pour la modélisation volumique.

24.2.2 Performance en modélisation et caractéristiques sociodémographiques

Les recherches citées dans notre revue de littérature concernent des étudiants engagés dans des formations en CAO et sont menées par des enseignants de CAO souhaitant améliorer leurs dispositifs pédagogiques. Ils ne mettent pas en regard les caractéristiques sociodémographiques de leurs étudiants et leur performance en modélisation. Nous reprenons les mêmes variables extrinsèques que nous avons traitées pour la performance spatiale afin d'écarter des variables cachées. Nous n'obtenons pas de résultat significatif pour notre échantillon liant la performance en modélisation et :

- le genre ($U = 1538,0$; $p = 0,238$). L'absence de significativité de ce résultat pourrait être expliqué par le faible effectif de femmes dans notre échantillon ($N_F = 26$ [20,2%] femmes et $N_H = 103$ [79,8%] hommes) ;
- la prévalence manuelle ($\chi^2(2) = 4,40$; $p = 0,111$). L'absence de significativité de ce résultat pourrait être expliqué par les faibles effectifs de gauchers et d'ambidextres de notre échantillon ($N_D = 107$ [82,9%] droitiers, $N_G = 17$ [13,2%] gauchers et $N_A = 5$ [3,9%] ambidextres) ;
- le nombre de langues maternelles apprises ($U = 698,5$; $p = 0,067$). L'absence de significativité de ce résultat pourrait être expliqué par le faible effectif d'étudiants ayant appris deux langues maternelles dans notre échantillon ($N_{1LM} = 106$ [82,2%] étudiants ayant appris une langue maternelle, $N_{2LM} = 18$ [14,0%] étudiants ayant appris deux langues maternelles et $N_M = 5$ [3,9%] étudiants pour lesquels l'information est manquante) ;
- les loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence, ainsi que ceux pratiqués à l'âge adulte.

24.2.3 Performance en modélisation et formation post-bac

Les variables relatives à la formation antérieure des étudiants ont aussi été explorées. Nous avons trouvé une différence significative de performance favorable aux étudiants issus de formations technologiques ($U = 2484,0$; $p = 0,035$). De plus, nos résultats établissent une différence de performance significative entre les étudiants de notre échantillon selon leur pratique antérieure de logiciels de modélisation pour l'exercice de modélisation ($U = 1264,5$; $p = 0,007$). Les étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation performant moins bien que ceux qui en ont pratiqué au moins un. Finalement, il existe une différence de performance significative entre les étudiants de notre échantillon selon le nombre de logiciels de modélisation pratiqués pour l'exercice de modélisation en faveur d'un nombre croissant de logiciels pratiqués ($\chi^2(3) = 9,11$; $p = 0,028$). Ces résultats pourraient être approfondis en vérifiant la relation entre pratique de logiciels volumiques et formation antérieure, et nombre de logiciels volumiques et formation antérieure.

Ces résultats, mis en perspective avec les résultats non significatifs obtenus concernant les caractéristiques sociodémographiques, suggèrent que la performance en modélisation est liée à un apprentissage formel de cette activité. Ceci confirmerait que cet apprentissage antérieur comprendrait des connaissances procédurales applicables à tous les logiciels (Chester, 2007, p. 23; Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Lang *et al.*, 1991, p. 258; Rynne et Gaughran, 2007, p. 59).

La plateforme de modélisation Onshape utilisée dans notre protocole expérimental n'offrait qu'une version en langue anglaise au moment de notre expérimentation. Nous voulons vérifier

que la maîtrise de cette langue n'affecte pas la performance en modélisation. Nous n'avons pas retenu la faible corrélation significative entre ces deux variables ($r_s = 0,195$; $n = 128$; $p = 0,028$) en raison de l'absence de concentration de la dispersion autour de la droite de corrélation. Nous en concluons que la maîtrise de la langue de l'interface n'a pas affecté la performance des étudiants.

24.2.4 Stratégies de modélisation et habileté spatiale

24.2.4.1 Habileté spatiale et nombre de cercles, nombre d'esquisses, nombre d'extrusions et stratégie de perçage

Notre protocole expérimental et notre méthodologie de traitements des données visent à caractériser les stratégies de modélisation, telles que perçues dans les productions finales des étudiants, accessibles dans la plateforme. Nous avons relevé le nombre de cercles, le nombre d'esquisses, le nombre d'extrusions et la stratégie de perçage. Ces variables sont des indicateurs de la capacité des étudiants à opter pour des stratégies optimales de modélisation. Nous n'avons pas obtenu de résultats significatifs entre ces variables et les scores aux tests spatiaux.

24.2.4.2 Performance en modélisation et stratégie de perçage

De même, nous n'avons pas trouvé de lien significatif entre la performance à la modélisation, telle qu'évaluée au travers des critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels, et la stratégie de perçage. Ces résultats gagneraient à être précisés en interrogeant les étudiants sur les formations à la modélisation qu'ils ont reçues : leur pratique des logiciels a-t-elle été accompagnée d'un enseignement formel et si oui, au-delà d'une formation à la prise en mains des logiciels, comprenait-il une formation aux stratégies de modélisation ?

24.2.4.3 Habileté spatiale et variables composées performance/stratégie de modélisation

De manière à mieux catégoriser les réalisations des étudiants, nous avons créé des variables alliant des indicateurs de performance et de stratégie. Les deux résultats significatifs concernent le CFT1, c'est-à-dire le test de dissociation : variable Nombre de volumes - stratégie de perçage ($F(3,125) = 3,37$; $p = 0,021$) ; variable Nombre de volumes – nombre d'esquisses – stratégie de perçage ($F(5,123) = 2,92$; $p = 0,016$) ; variable Nombre de volumes – nombre d'esquisses – stratégie de perçage ($F(6,122) = 2,63$; $p = 0,020$). Nous constatons que les étudiants qui obtiennent les meilleurs scores à ce test :

- produisent les six volumes attendus, qu'ils percent directement ou pas ;
- produisent les six volumes attendus et le nombre d'esquisses attendu, qu'ils percent directement ou pas ;
- produisent les six volumes attendus et le nombre d'extrusions attendu, qu'ils percent directement ou pas.

Le CFT nécessite la capacité à extraire un élément intriqué dans un motif complexe. Notre exercice de modélisation consiste à réaliser une pièce à partir de trois vues en perspective d'une pièce en 3D. Le fonctionnement de la plateforme Onshape nécessite de produire une esquisse à laquelle on peut ensuite appliquer des fonctions. Il s'agit donc d'extraire des représentations en 3D de la pièce globale les éléments géométriques 2D constitutifs des esquisses auxquelles on va appliquer des balayages. Nos résultats suggèrent que la capacité à extraire des éléments

intriqués soit utile pour identifier les éléments géométriques des pièces 3D, mais qu'elle ne soit pas liée à la capacité à repérer la surface d'extrusion la plus efficace : dans les trois résultats significatifs obtenus, les étudiants obtiennent des résultats élevés au CFT1, quelle que soit leur stratégie de perçage.

24.2.4.4 Habileté spatiale et indicateurs géométriques

Nous observons une relation significative entre la stratégie de définition de la longueur de la pièce et la performance aux cinq tests spatiaux : PSVT:V1 ($\chi^2(2) = 9,32$; $p = 0,009$), R PSVT:R1 ($\chi^2(2) = 12,30$; $p = 0,002$), MRT1 ($\chi^2(2) = 6,02$; $p = 0,049$), MCT1 ($\chi^2(2) = 12,78$; $p = 0,004$), CFT1 ($F(2,126) = 5,91$; $p = 0,004$). Les meilleurs scores spatiaux sont obtenus par les étudiants qui décomposent la longueur totale en différentes cotes, suivis des étudiants qui définissent la longueur entre les deux extrémités, puis les étudiants qui ne définissent pas la longueur totale. Ainsi les étudiants, lorsqu'ils sont regroupés selon leur stratégie de définition de la longueur totale, qui décomposent, correctement ou pas, la longueur totale, obtiennent systématiquement les meilleures performances spatiales. Autrement dit, la catégorie des étudiants qui ne définissent pas la longueur totale ne démontrent pas de capacité à créer, transformer et reconnaître des formes et des objets mentalement au travers des tests spatiaux.

Nous obtenons des résultats assez similaires pour la justesse de la symétrie. Les résultats sont significatifs pour tous les tests, à l'exception du MRT1 ($U = 2217,5$; $p = 0,065$) : PSVT:V1 ($U = 2243$; $p = 0,025$), R PSVT:R1 ($U = 2239,5$; $p = 0,050$), MCT1 ($U = 2458$; $p = 0,002$), CFT1 ($t(127) = -3,50$; $p < 0,001$). Les étudiants dont la symétrie n'est pas correcte, qu'ils l'aient définie ou pas, produisent des scores spatiaux plus faibles que les étudiants dont la symétrie de la pièce est correcte.

En combinant ces deux variables, nous avons composé une variable alliant performance (respect de la contrainte de symétrie, justesse de la longueur totale) et stratégie de modélisation (stratégie de définition de la longueur totale). Les résultats sont significatifs pour tous les tests, à l'exception du MRT1 ($\chi^2(4) = 7,09$; $p = 0,131$) : PSVT:V1 ($\chi^2(4) = 9,82$; $p = 0,044$), R PSVT:R1 ($\chi^2(4) = 14,60$; $p = 0,006$), MCT1 ($\chi^2(4) = 15,45$; $p = 0,004$), CFT1 ($F(4,124) = 4,67$; $p = 0,002$). Pour ces quatre tests, les étudiants dont la longueur totale n'est pas définie, et donc incorrecte, et dont la symétrie n'est pas correcte, produisent les scores spatiaux les plus faibles.

24.2.4.5 Performance en modélisation et indicateurs géométriques

Nous obtenons des résultats similaires pour le lien entre définition des contraintes géométriques longueur totale et symétrie d'une part, et performance en modélisation, d'autre part : les étudiants qui décomposent la longueur totale, correctement ou pas, obtiennent les meilleurs scores de modélisation ($\chi^2(2) = 17,29$; $p < 0,001$).

La variable composée Longueur totale - Symétrie est aussi significativement liée à la performance en modélisation ($\chi^2(4) = 36,72$; $p < 0,001$). Les étudiants qui définissent correctement la longueur totale, quelle que soit leur stratégie, que la symétrie soit correcte ou pas, obtiennent les meilleurs scores de modélisation. Plus que la justesse de la longueur totale et de la symétrie, il semble que ce soit la capacité à les déterminer qui soit liée à la performance en modélisation.

Ces résultats montrent la pertinence de l'habileté spatiale pour identifier les informations dimensionnelles dans les vues en perspective et définir les contraintes géométriques et dimensionnelles élémentaires de la pièce, ainsi que l'importance de la géométrie dans la modélisation volumique.

24.2.5 Synthèse

Nous regroupons les résultats des hypothèses dans le tableau 177 pour tenter de dessiner un portrait des caractéristiques des tests spatiaux que nous avons testés à partir des variables liées à la modélisation que nous avons testées sur notre échantillon.

Tableau 177. Caractéristiques liées à la modélisation des cinq tests spatiaux

Catégorie	Variable	Visualisation spatiale			Orientation spatiale	
		R PSVT:R	MRT	MCT	PSVT:V	CFT
Performance	Évaluation /35	✓	✓	✓	✓	✓
	N volumes	✗	✗	✗	✗	✓
	Symétrie	✓	✗	✓	✓	✓
Stratégie	L totale	✓	✓	✓	✓	✓
	N cercles	✗	✗	✗	✗	✗
	N esquisses	✗	✗	✗	✗	✗
	N extrusions	✗	✗	✗	✗	✗
	Perçage clavette	✗	✗	✗	✗	✗
Performance et stratégie	N volumes - perçage	✗	✗	✗	✗	✓
	N volumes – N esquisses - perçage	✗	✗	✗	✗	✓
	N de volumes – N extrusions - perçage	✗	✗	✗	✗	✓
	L totale - Symétrie	✓	✗	✓	✓	✓

Légende. N = nombre ; L = longueur volumiques ; ✗ = absence de résultat significatif ; ✓ = présence d'un résultat significatif.

Nous observons des corrélations faibles mais significatives entre la performance aux cinq tests spatiaux utilisés dans notre protocole et la performance en modélisation évaluée au travers de critères dimensionnels, géométriques et fonctionnels. Il semblerait que les compétences mesurées dans les tests spatiaux permettent de comprendre les représentations d'objets 3D, d'en extraire les informations utiles et de les utiliser à bon escient pour modéliser des objets 3D au travers d'un modèleur volumique. Le fonctionnement de notre modèleur, qui nécessite la création d'une esquisse à laquelle on applique des balayages, requiert la transformation de représentations 2D d'un objet 3D (le modèle présenté sous différents points de vue dans l'exercice) en une forme 2D (l'esquisse), créée à partir de relations géométriques et dimensionnelles reconnues et extraites du modèle, pour la transformer en un objet 3D grâce aux balayages. Cette activité mobilise des compétences de compréhension et de manipulation de formes 2D et d'objets 3D.

Nous observons de plus que les étudiants qui définissent la longueur totale, en la décomposant ou en la contraignant en une cote, obtiennent les scores les plus élevés aux cinq tests spatiaux. Repérer, comprendre et implémenter cette cote semble être lié à la capacité à reconnaître, comprendre et transformer des objets en 2D et en 3D.

Nous remarquons en revanche que la performance aux tests spatiaux n'est pas liée au nombre de cercles, d'esquisses et d'extrusions, ni à la stratégie de perçage. Les capacités spatiales semblent intervenir plutôt sur les aspects géométriques de la modélisation que dans la planification de l'activité.

Bien que nous obtenions des corrélations significatives entre les scores de modélisation (critères dimensionnels, géométriques et fonctionnels), la justesse de la symétrie et le choix d'une stratégie de définition de la longueur totale et les cinq tests spatiaux, nous remarquons que seul le CFT est significativement lié aux variables relatives à la performance que nous avons retenues pour nos hypothèses. Ceci s'explique en partie par le fait que c'est le seul test à être significativement lié au nombre de volumes fonctionnels, soit la capacité à créer la forme globale de la pièce. Nous observons cependant que lorsque les six volumes sont réalisés, les étudiants obtenant de bons scores au CFT ont tendance à produire le nombre attendu d'esquisses et d'extrusions, qui relèvent de la stratégie de modélisation.

La performance en modélisation est traditionnellement comparée aux scores de visualisation spatiale (Branoff et Dobelis, 2012a, p. 39; Hamlin *et al.*, 2006, p. 11.493.3; Sorby, 1999b, p. 4.465.3; Steinhauer, 2012, p. 44). Bien que les cinq tests spatiaux que nous avons choisis sont pertinents pour évaluer le lien entre habileté spatiale et justesse de la modélisation, nous concluons de nos résultats que le test d'orientation spatiale, le CFT, est plus pertinent pour évaluer le lien entre l'habileté spatiale et la performance en modélisation et les stratégies qui y sont mobilisées. Ce test nécessite la capacité à dissocier un élément du motif complexe dans lequel il est intriqué. Nos résultats suggèrent que cette compétence est utile pour modéliser des objets, cette activité nécessitant d'extraire des éléments à partir d'une représentation d'un objet et de créer des éléments constitutifs d'un ensemble complexe.

Nous n'observons pas de liens significatifs entre la performance en modélisation à l'arrivée à l'école, évaluée au travers de critères dimensionnels, géométriques et fonctionnels, et les caractéristiques sociodémographiques des étudiants. En revanche, nos traitements mettent en évidence des relations significatives entre performance à cette tâche et formation technologique et pratique des modeleurs. Ceci suggère que la capacité à réaliser ces tâches est développée grâce à des apprentissages et/ou pratiques ciblés, qui n'ont pas d'équivalents dans les pratiques de la vie quotidienne ou des loisirs.

24.3 Évolutions en habileté spatiale suite à des enseignements en école d'ingénieurs spécialisée en mécanique

Le deuxième recueil de données consiste à répéter les prises de performance pour l'habileté spatiale et la modélisation après que les étudiants ont reçu des enseignements. Ceux-ci comprennent notamment des mathématiques appliquées, de l'analyse de mécanisme, de l'algorithmique et de la formation aux modeleurs volumiques et à la modélisation volumique. Nos traitements visent à caractériser l'éventuelle évolution de la performance spatiale des étudiants en première années d'études d'ingénieurs à ISAE-Supméca après avoir suivi un semestre d'enseignements. Nous allons dans un premier temps discuter les résultats obtenus en rapport avec les caractéristiques sociodémographiques de notre échantillon, puis celles relatives

à la formation, puis les notes aux évaluations individuelles pour les enseignements, puis les stratégies mobilisées dans la résolution des tâches présentées dans les tests spatiaux.

24.3.1 Caractérisation de l'évolution de la performance spatiale

La méta-revue d'Uttal *et al.* (2013) s'appuie sur 206 études évaluant l'effet d'interventions pédagogiques visant à améliorer l'habileté spatiale. Celles-ci adoptent un protocole comprenant des groupes tests et des groupes témoin. La méta-revue établit la malléabilité de l'habileté spatiale, que la formation soit indirecte, c'est-à-dire réalisée à travers des enseignements ou des jeux vidéo, ou spécifique, i.e. réalisée à travers des exercices, des enseignements orientés stratégie ou des leçons sur ordinateur (p. 356).

Notre recherche n'a pas de caractère interventionniste : nous n'observons pas l'effet d'un dispositif pédagogique visant à faire progresser l'habileté spatiale. Nous avons pour objectif d'observer et caractériser les compétences spatiales d'étudiants à différentes étapes de leur parcours de première année en école d'ingénieurs. Suite aux enseignements du premier semestre, nous constatons une évolution significative de la performance à tous les tests spatiaux :

- PSVT:V : $p < 0,001$;
- R PSVT:R : $p = 0,034$;
- MRT : $p < 0,001$;
- MCT : $p < 0,001$;
- CFT : $p < 0,001$.

Nous observons d'autre part une progression supérieure à l'effet d'entraînement, attribuable à $0,2\sigma$, pour tous les tests :

- PSVT:V : gain moyen/écart type = 0,75 ;
- R PSVT:R : gain moyen/écart type = 0,26 ;
- MRT : gain moyen/écart type = 0,92 ;
- MCT : gain moyen/écart type = 0,71 ;
- CFT : gain moyen/écart type = 2,00.

Cette progression est néanmoins limitée pour des groupes d'étudiants qui progressent peu entre les deux prises de données et restent décrochés pour le PSVT:V, le R PSVT:R et le MRT.

Ce résultat est confirmé par les analyses de régression linéaire testant la relation entre la première et la deuxième prise de performance : les régressions sont toutes significatives et établissent l'effet de la performance initiale sur la performance mesurée au second recueil. Les étudiants progressent mais les plus faibles avant avoir reçu les enseignements restent plus faibles au terme du premier semestre.

24.3.2 Relation entre évolution des scores et variables extrinsèques

24.3.2.1 Évolution des compétences spatiales et genre

Uttal *et al.* (2013) comparent les progressions des hommes et des femmes au travers des quarante-huit études de leur échantillon qui précisent les moyennes pré-tests et posttests des

groupes selon le genre (p. 364). La comparaison de ces données leur permet de conclure qu'il n'y a pas de différence de progression entre les hommes et les femmes. Dans ce traitement, les auteurs ne distinguent pas les tests spatiaux utilisés dans ces études.

Conformément à cette étude, notre recherche indique un résultat non significatif pour la progression au R PSVT:R, au MCT et au CFT. Nous obtenons cependant un résultat significatif en faveur des femmes pour la progression au PSVT:V ($F(1,79) = 4,63$; $p = 0,034$) et un résultat faiblement significatif en faveur des femmes pour la progression au MRT ($F(1,86) = 3,83$; $p = 0,054$). Dans le cas du PSVT:V, les femmes, de l'échantillon ayant assisté à la première prise de données, obtiennent des résultats significativement plus faibles que les hommes au premier recueil. Ce qui n'est pas le cas pour le MRT. Les enseignements du premier semestre auraient permis aux femmes de mieux résoudre les tâches dans lesquelles il est préconisé de changer de point de vue. Ces résultats sont cependant à prendre avec prudence, en raison de la faible proportion de femmes ayant assistés aux deux recueils de notre échantillon : $N_F = 18$ [21%] femmes et $N_H = 67$ [79%] hommes. D'autre part, les femmes de notre échantillon sont particulières, car spécialisées en STIM et issues d'une double sélection, ce qui n'est pas le cas des femmes de l'étude d'Uttal *et al.*

24.3.2.2 Évolution des compétences spatiales et variables relatives aux langues

Nous observons un effet principal du nombre de langues maternelles apprises sur l'évolution au PSVT:V ($F(1,80) = 12,23$; $p < 0,001$). Les étudiants ayant appris deux langues maternelles obtiennent des scores plus faibles au premier recueil et progressent plus que les étudiants ayant appris une langue maternelle. Malgré cette progression, les étudiants ayant appris une langue maternelle maintiennent une performance supérieure. Nous observons le même résultat pour la relation entre évolution en performance au PSVT:V et niveau d'anglais ($F(2,80) = 8,12$; $p < 0,001$). Pour ce test, les étudiants les plus faibles semblent avoir davantage progressé. La formation suivie aurait permis aux étudiants les plus faibles de réaliser la meilleure progression, sans pour autant combler les écarts.

Nous observons un effet d'interaction inter-sujet significatif entre le groupe de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises pour l'évolution de la performance au PSVT:V ($F(2,80) = 3,95$; $p = 0,023$). Tous les groupes progressent mais la progression la plus forte concerne les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant les scores les plus faibles en anglais ($M = 19,50$, $ES = 1,37$), soit les étudiants aux scores de PSVT:V les plus faibles aux deux recueils. Les enseignements permettent de progresser, en particulier les étudiants aux faibles scores à la première prise de données, mais n'effacent pas les écarts de performance.

Nous constatons que les étudiants ayant appris une langue maternelle obtiennent les scores les plus élevés au premier recueil et progressent au R PSVT:R (effet intra-sujet : $F(1,84) = 5,22$; $p = 0,025$). En revanche, les étudiants ayant appris deux langues maternelles, plus faibles au premier recueil, régressent pour certains. Les étudiants aux scores de TOEIC modérés obtiennent parmi les scores les plus faibles au R PSVT:R et progressent davantage ($F(2,84) = 3,87$; $p = 0,025$), à la différence des étudiants aux scores de TOEIC les plus faibles. Les enseignements permettraient donc aux apprenants obtenant les scores les plus élevés au R PSVT:R de progresser, mais pas aux étudiants les plus faibles.

Nous constatons un effet d'interaction intra-sujet faiblement significatif entre le groupe de TOEIC et le nombre de langues maternelles apprises pour l'évolution de la performance au

R PSVT:R ($F(2,84) = 3,09$; $p = 0,051$). Cette interaction révèle que tous les groupes progressent, à l'exception des étudiants ayant appris deux langues maternelles et aux scores de TOEIC élevés qui régressent ($M_1 = 26,33$, $ES_1 = 1,88$; $M_2 = 21,67$, $ES_2 = 1,60$). Cela concerne cependant un très faible effectif ($n = 4$; 4%). La progression au R PSVT:R la plus forte concerne les étudiants ayant appris une langue maternelle et obtenant des scores modérés en anglais ($M_1 = 25,68$, $ES_1 = 0,53$; $M_2 = 26,73$, $ES_2 = 0,46$) et les étudiants ayant appris deux langues maternelles et obtenant les scores les plus faibles en anglais ($M_1 = 23,25$, $ES_1 = 1,63$; $M_2 = 24,25$, $ES_2 = 1,39$).

Les variables relatives à la pratique des langues n'apparaissent pas dans les études consacrées à l'évolution de l'habileté spatiale que nous avons consultées. Nous proposons cependant de rapprocher les résultats relatifs aux langues obtenus à ceux d'Uttal *et al.* (2013). Nous observons le même phénomène dans notre recherche pour les étudiants aux faibles scores d'anglais et ayant appris deux langues maternelles qui ont obtenu de plus faibles scores en ce qui concerne le PSVT:V et qui progressent davantage.

24.3.2.3 Évolution des compétences spatiales et prévalence manuelle

L'étude d'Uttal *et al.* ne met pas en regard l'évolution des compétences spatiales grâce à des dispositifs pédagogiques dédiés avec les caractéristiques sociodémographiques autre que le genre et l'âge. Nous reprenons les mêmes variables extrinsèques que nous avons traitées pour la performance spatiale afin d'écarter des variables cachées. Nous n'obtenons pas de résultat significatif liant l'évolution de la performance aux tests spatiaux et la prévalence manuelle ($\chi^2(2) = 4,40$; $p = 0,111$). L'absence de significativité de ce résultat pourrait être expliquée par le faible effectif de gauchers et ambidextres dans notre échantillon ($N_D = 107$ [82,9%] droitiers, $N_G = 17$ [13,2%] gauchers et $N_A = 5$ [3,9%] ambidextres).

24.3.2.4 Évolution des compétences spatiales et pratique de loisirs

Nous obtenons des effets principaux significatifs établissant la relation entre évolution des scores spatiaux et loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence : loisirs manipulatoires et évolution de la performance au MCT ($F(10,14) = 2,62$; $p = 0,049$), loisirs manipulatoires et évolution de la performance au MRT ($F(10,14) = 2,71$; $p = 0,043$), loisirs manipulatoires et évolution de la performance au CFT ($F(10,15) = 2,52$; $p = 0,051$) et loisirs 2D et évolution de la performance au MRT ($F(3,14) = 3,84$; $p = 0,034$). Cependant les différences de progression entre les catégories que nous avons déterminées et leurs effectifs rendent difficile l'interprétation de ces résultats.

Il en est de même pour des loisirs pratiqués à l'âge adulte : loisirs dynamiques et évolution de la performance au PSVT:V ($F(7,30) = 4,21$; $p = 0,002$), loisirs manipulatoires et évolution au R PSVT:R ($F(5,34) = 3,28$; $p = 0,016$), loisirs de construction 3D et évolution de la performance au PSVT:V ($F(3,30) = 3,46$; $p = 0,028$), loisirs de construction 3D et évolution de la performance au MCT ($F(3,35) = 3,85$; $p = 0,017$), loisirs artistiques et évolution de la performance au PSVT:V ($F(3,30) = 5,83$; $p = 0,003$). Cependant les différences de progression entre les catégories que nous avons déterminées et leurs effectifs rendent difficile l'interprétation de ces résultats. Ils suggèrent cependant que la pratique de loisirs entre les prises de données a influencé la progression de la performance au PSVT:V, au R PSVT:R et au MCT.

24.3.2.5 Évolution des compétences spatiales et formation antérieure à ISAE-Supméca

Nous constatons un effet principal inter-sujet de la formation antérieure sur l'évolution au MRT ($F(1,88) = 4,72$; $p = 0,032$). Les étudiants avec et sans bagage technologique progressent, avec une progression plus marquée pour les étudiants sans bagage technologique, les écarts sont cependant maintenus : les étudiants de formation technologique restent plus faibles à ce test de rotation mentale.

Nos traitements mettent en évidence un effet principal inter-sujet de la pratique antérieure de logiciels de modélisation sur l'évolution au R PSVT:R ($F(1,87) = 4,04$; $p = 0,047$), au MCT ($F(1,88) = 4,04$; $p = 0,004$) et au CFT ($F(1,88) = 5,07$; $p = 0,027$). Les étudiants avec et sans pratique semblent suivre la même progression pour le MCT et le CFT, les écarts sont donc maintenus. Malgré une progression plus importante des étudiants sans pratique antérieure au R PSVT:R, les écarts restent aussi maintenus.

Nous constatons un effet principal inter-sujet du nombre de logiciels de modélisation pratiqués sur l'évolution au MCT ($F(1,88) = 4,72$; $p = 0,032$). Les étudiants ayant pratiqué aucun, un et deux logiciels progressent significativement, à la différence de ceux qui en ont pratiqué 3. Ces derniers obtenaient des résultats très élevés au premier recueil, leur laissant ainsi peu de marge de progression. Cette progression permet aux étudiants ayant pratiqué un et deux logiciels de s'approcher de la performance des étudiants ayant pratiqué trois logiciels. Les étudiants sans pratique restent les plus faibles, malgré une forte progression.

Ces résultats semblent indiquer que la progression des étudiants est relativement homogène pour toutes les catégories et que malgré cette évolution, les étudiants les plus faibles, ici caractérisés par une absence de pratique de logiciels pour le R PSVT:R, le MCT et le CFT, continuent de moins bien performer que leurs pairs. La progression au MRT, en revanche, semble plus prononcée pour les étudiants aux scores les plus élevés au premier recueil, soit les étudiants de formation non-technologique.

Les variables relatives au bagage technologique et la pratique des logiciels de modélisation n'apparaissent pas dans les études consacrées à l'évolution de l'habileté spatiale que nous avons consultées. Nous proposons cependant de rapprocher les résultats relatifs à la formation antérieure obtenus pour le MCT et le CFT de ceux d'Uttal *et al.* (2013). Les auteurs utilisent les dix-neuf études dans leur échantillon qui ont retenu les étudiants les plus faibles pour leurs formations aux compétences spatiales et observent des effets de la formation plus importants pour ces études que pour les 187 autres de leur échantillon (p. 365). Les auteurs suggèrent que ce résultat indique une progression plus importante pour les étudiants les plus faibles. Nous observons le même phénomène dans notre recherche pour les étudiants sans bagage technologique et sans pratique antérieure de logiciels de modélisation qui ont obtenu de plus faibles scores en ce qui concerne le MCT et le CFT. Nos résultats concernant le MRT contredisent les résultats d'Uttal *et al.* : les étudiants sans bagage technologique performant mieux dès le premier recueil et progressent davantage que ceux ayant reçu des enseignements technologiques.

24.3.3 Évolution des scores spatiaux et performance académique

Nous n'observons pas d'effet principal de la performance aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO sur l'évolution de la performance aux tests spatiaux. Autrement dit, nous ne pouvons établir de lien entre la maîtrise de ces apprentissages et une progression aux

tests spatiaux. Ceci n'écarte pas la possibilité que ces enseignements aient contribué à l'amélioration des scores, que soit individuellement ou collectivement.

Nous relevons d'autre part des résultats significatifs concernant les liens entre la performance à deux ou trois enseignements du premier semestre (MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO) et l'évolution :

- au MRT avec les catégories de scores de PCAT et ALGO ($F(2,21) = 7,40$; $p = 0,004$), avec les scores de PCAT et AMEC ($F(1,21) = 4,20$; $p = 0,053$), avec les scores de MAPP et ALGO ($F(2,21) = 5,17$; $p = 0,015$), avec les scores de MAPP, PCAT et ALGO ($F(1,21) = 7,20$; $p = 0,014$) ;
- au PSVT:V avec les catégories de scores de MSOL et AMEC ($F(1,15) = 4,73$; $p = 0,046$) ;
- au CFT avec les catégories de scores de PCAT et ALGO (CFT : $F(2,21) = 3,62$; $p = 0,045$).

24.3.4 Évolution des scores et stratégies de résolution

Nos traitements ont mis en évidence un effet principal du nombre de stratégies adoptées au PSVT:V au second recueil sur l'évolution de la performance à ce test ($F(2,55) = 3,04$; $p = 0,056$). La progression est significative pour les étudiants ayant déclaré mobiliser une ($n = 46$) et deux ($n = 27$) stratégies dans les verbatim du second recueil, à la différence de ceux qui en ont déclaré trois ($n = 5$). On constate à nouveau pour le PSVT:V qu'une catégorie à très faible performance au premier recueil, ici une seule stratégie, produit la meilleure progression. Nous ne pouvons cependant pas dire si ces étudiants adoptaient le même nombre de stratégies au premier recueil.

Il n'y a pas d'effet principal du changement de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim du deuxième recueil sur l'évolution de la performance à ces tests.

Nos traitements ont mis en évidence un effet principal de la combinaison de stratégie adoptée pour le PSVT:V au second recueil sur l'évolution de la performance à ce test ($F(7,55) = 2,49$; $p = 0,027$). Cette progression est significative pour les étudiants qui ont adopté les combinaisons de stratégie QCMN (rotation mentale), QCMQ (stratégie analytique et rotation mentale) et QCMX (changement de point de vue et rotation mentale) au deuxième recueil. Toutes ces stratégies utilisent la rotation mentale. Seule la catégorie QCMX comprend la stratégie de changement de point de vue : c'est aussi la catégorie qui obtenait les scores les plus faibles parmi ces trois catégories et qui marquent la plus forte progression. On constate à nouveau pour le PSVT:V qu'une catégorie à très faible performance au premier recueil produit la meilleure progression. Nous n'avons pas vérifié si ces étudiants adoptaient le même nombre de stratégies au premier recueil.

24.3.5 Synthèse

Nous regroupons les résultats des hypothèses dans le tableau 178 pour tenter de dessiner un portrait des caractéristiques des évolutions des tests spatiaux que nous avons testés à partir des variables que nous avons testées sur notre échantillon.

Tableau 178. Caractéristiques des évolutions des cinq tests spatiaux

Catégorie	Variable	Visualisation spatiale			Orientation spatiale	
		R PSVT:R	MRT	MCT	PSVT:V	CFT
Sociodémo - graphique	Genre	✕	Femmes >	✕	Femmes >	✕
	N langues maternelles	1	✕	1 > 2	2	✕
	Prévalence manuelle	✕	✕	✕	✕	✕
Formation	TOEIC	Modérés	✕	✕	Modérés et faibles > élevés	✕
	Formation	✕	Sans techno	✕	✕	✕
	Pratique modeleurs	Sans pratique >	✕	Sans pratique // avec pratique	✕	Sans pratique // avec pratique
	N modeleurs	✕	✕	0, 1 et 2	✕	✕
Loisirs – enfance et adolescence	dynamiques	✕	✕	✕	✕	✕
	manipulatoires	✕	✓	✓	✕	✕
	2D	✕	✓	✕	✕	✕
	construction	✕	✕	✕	✕	✕
	artistiques	✕	✕	✕	✕	✕
Loisirs – âge adulte	dynamiques	✕	✕	✕	✓	✕
	manipulatoires	✓	✕	✕	✕	✕
	2D	✕	✕	✕	✕	✕
	construction	✕	✕	✓	✓	✕
	artistiques	✕	✕	✕	✓	✕
Efficacité stratégie	Combinaison	✕	✕	✕	✓	✕
	N stratégies (QCM)	✕	✕	✕	1 et 2	✕
	Changement	✕	✕	✕	✕	✓
Performance académique	ALGO	✕	✕	✕	✕	✕
	AMEC	✕	✕	✕	✕	✕
	PCAT	✕	✕	✕	✕	✕
	MAPP	✕	✕	✕	✕	✕

Légende. N = nombre ; 1 > 2 = meilleure progression pour les étudiants ayant appris une langue maternelle que ceux en ayant appris deux ; Femmes > = meilleure progression des femmes ; Sans pratique > = meilleure progression pour les étudiants sans pratique des modeleurs volumiques ; // = similaire à volumiques ; ✕ = absence de résultat significatif ; ✓ = présence d'un résultat significatif.

Nous observons une progression significative pour tous les tests spatiaux à la fin du premier semestre. Cette progression est supérieure à l'effet d'entraînement, ce qui suggère que les enseignements suivis au premier semestre ont permis aux étudiants de progresser.

Cependant, un petit nombre d'étudiants restent décrochés pour les deux tests de rotation mentale, le R PSVT:R et le MRT, et le test de changement de point de vue le PSVT:V, que 93% ($n = 78$) des étudiants résolvent en utilisant la rotation mentale en stratégie unique ($n = 51$; 61%) ou combinée ($n = 17$; 20%). Il se peut que les enseignements suivis à ISAE-Supméca

n'aient pas permis à ces étudiants de progresser dans cette stratégie. Malgré la progression générale, la performance au second recueil est liée significativement à la performance avant les enseignements : les étudiants progressent mais les écarts de performance initiaux sont maintenus.

L'évolution au R PSVT:R (Yoon, 2011) s'explique largement par l'effet d'entraînement. Ce résultat peut en partie s'expliquer par le fait que les scores étaient élevés dès la première prise de performance, laissant peu de marge de progression. Nous suggérons aussi que le format du test, qui n'est pas limité dans le temps, explique cette faible évolution due à une performance élevée dès la première prise de performance : Maeda et Yoon (2013) ont constaté que le temps de réponse affecte la performance des hommes et des femmes au PSVT:R (Guay, 1976a). La différence de performance constatée en faveur des hommes diminue en l'absence de limite de temps (p. 87). Les auteures suggèrent que le stress ou la vitesse de réponse affectent la performance des femmes lorsque le temps d'administration est très contraint, résultant en une plus grande différence dans les résultats entre les hommes et les femmes. L'absence de limite de temps au R PSVT:R permettrait d'éviter ces effets et de « mesurer le véritable niveau d'habileté spatiale d'un individu [*measure an individual's true spatial ability level*] » (Yoon et Mann, 2017, p. 316).

L'absence de lien significatif avec les évaluations individuelles de MAPP, ALGO, AMEC et PCAT montre que le niveau de maîtrise des connaissances et compétences enseignées dans ces matières n'a pas d'effet sur l'évolution de la performance spatiale : que les étudiants obtiennent de bons résultats à ces enseignements ou pas, ils progressent aux tests spatiaux.

Dans le cas du PSVT:V, l'évolution concerne avant tout les catégories dont les scores étaient plus faibles en moyenne marginale au premier recueil : les étudiants de sexe féminin, les étudiants ayant appris deux langues maternelles et les étudiants aux scores de TOEIC faibles et modérés, les étudiants qui utilisent une stratégie unique au second recueil. C'est aussi le cas pour la progression au R PSVT:R en ce qui concerne la pratique antérieure de modeleurs volumiques, pour laquelle les étudiants sans pratique de modeleurs plus faibles au premier recueil progressent davantage.

On remarque en revanche des progressions similaires, quel que soit le niveau de départ, au MCT et au CFT concernant les catégories de pratique de modeleurs : que les étudiants aient obtenus des scores plus faibles au premier recueil, c'est-à-dire les étudiants sans pratique de la modélisation volumique, ou pas, ils progressent de manière homogène. Ce qui confirme le résultat significatif de l'effet du niveau de départ sur la progression des étudiants à ces deux tests, sans décrochage d'étudiants plus faibles.

On observe finalement une série de résultats significatifs montrant une progression plus importante pour des catégories dont les scores étaient élevés au premier recueil et qui progressent davantage au second recueil pour le R PSVT:R : les étudiants ayant appris une langue maternelle progressent significativement, à la différence de ceux en ayant appris deux et qui obtiennent en moyenne marginale des résultats plus faibles à ce test. De même, les étudiants aux scores de TOEIC modérés progressent significativement, à la différence des étudiants aux scores de TOEIC faibles et à la moyenne marginale faible au R PSVT:R. Ce test mobilise largement la rotation mentale ($n = 65$; 76%), seule ($n = 36$; 42%) ou combinée à une ou d'autres stratégies ($n = 29$; 34%). Ceci suggérerait à nouveau que les enseignements suivis n'aient pas permis aux étudiants faibles de progresser en rotation mentale. De même, la progression au MRT est plus prononcée pour les étudiants sans bagage technologique, qui

obtiennent des scores plus élevés en moyenne marginale au premier recueil. Ce test mobilise majoritairement des stratégies exemptes de rotation mentale ($n = 67$; 82%) au second recueil. Des tests supplémentaires sont nécessaires pour établir si l'évolution de la progression au R PSVT:R et au MRT est liée à un changement de stratégie ou au maintien d'une stratégie, et si ces actions sont bénéfiques à la performance à ces tests.

24.4 Évolutions en modélisation volumique suite à des enseignements en école d'ingénieurs spécialisée en mécanique

Nous allons dans un premier temps discuter les résultats obtenus pour les caractéristiques socio-démographiques de notre échantillon, puis celles relatives à la formation, puis les notes aux évaluations individuelles pour les enseignements, puis les stratégies mobilisées dans la tâche de modélisation.

24.4.1 Caractérisation de l'évolution de la performance en modélisation volumique

Notre recherche n'a pas de caractère interventionniste : il n'y a pas de mise en place de dispositif pédagogique visant à faire progresser la performance en modélisation conçu spécifiquement pour cette recherche. Nous avons pour objectif d'observer et caractériser l'activité des étudiants dans une tâche de modélisation, à différentes étapes de leur parcours de première année, qui contient des enseignements de modélisation volumique et de prise en mains de modèles volumiques.

Nous comparons nos résultats avec ceux de Lang *et al.* (1991), qui ont demandé à des experts et à des novices de réaliser un modèle filaire à partir de la vue de dessus et de la vue de côté cotées d'un objet. Les novices de cette expérimentation sont des étudiants de la *School of Technology* de l'université de Purdue, qui ont reçu deux semestres de formation à la CAO sur le modèleur filaire utilisé dans le protocole expérimental (p.259). Les deux experts sont des professionnels avec dix ans d'expérience en CAO pour l'un, et vingt ans d'expérience en conception technique pour l'autre. Nous considérons nos étudiants comme novices à la prise de performance du premier recueil et comme experts à la seconde prise de performance. Bien que le niveau d'expertise des étudiants d'ISAE-Supméca après un semestre de formation à la CAO ne soit pas comparable à l'expertise de professionnels, nous utilisons l'étude de Lang *et al.* pour vérifier la conformité de nos résultats, parce qu'elle est la seule dans notre revue de littérature qui compare des novices et des experts à partir du même protocole expérimental. Les résultats de la recherche de Lang *et al.* sont cependant à considérer avec prudence car leur significativité n'est pas établie.

Suite aux enseignements du premier semestre, nous constatons une évolution significative de la performance en modélisation ($p < 0,001$). Ce résultat correspond à ceux de Lang *et al.*, qui observent une performance plus élevée pour les experts (p. 260). Cette performance est mesurée au travers de la justesse des dimensions, de la forme globale et des contraintes géométriques, ce qui correspond aux critères dimensionnels, fonctionnels et géométriques de notre évaluation de la modélisation.

Nous observons d'autre part une progression supérieure à l'effet d'entraînement, attribuable à $0,2\sigma$ (gain moyen/écart type = 0,46). Cette progression est néanmoins limitée pour quelques étudiants qui progressent peu entre les deux prises de données. Ce résultat est confirmé par l'analyse de régression linéaire testant la relation entre la première et la deuxième prise de performance ($\beta = 0,18$; $t = 6,13$; $p < 0,001$). Les étudiants progressent mais les plus faibles

continuent de moins bien performer que leurs pairs après les enseignements, dont des enseignements de CAO.

24.4.2 Évolution en modélisation volumique et variables extrinsèques

À la différence des études traitant de la modélisation de notre revue de littérature, notre protocole a mesuré la performance en modélisation à l'aide du même outil de mesure, l'exercice de modélisation, avant et après les enseignements.

Nous reprenons les mêmes variables extrinsèques que nous avons traitées pour la performance spatiale afin d'écarter des variables cachées. Nous n'obtenons pas de résultat significatif liant l'évolution de la performance aux tests spatiaux et :

- genre ;
- prévalence manuelle ;
- nombre de langues maternelles apprises ;
- score de TOEIC ;
- loisirs pratiqués dans l'enfance et l'adolescence ;
- loisirs pratiqués à l'âge adulte.

Nous constatons un effet principal de la formation antérieure aux enseignements d'ISAE-Supméca sur l'évolution à l'exercice de modélisation intra-sujet ($F(1,91) = 11,58 ; p = 0,001$) et inter-sujet ($F(1,91) = 18,06 ; p < 0,001$). Les étudiants avec et sans bagage technologique progressent significativement. Les étudiants sans bagage technologique, dont la performance en moyenne marginale était plus faible que celle des étudiants avec bagage, semble progresser davantage et rattraper leurs pairs au second recueil. Ce résultat suggère que les enseignements reçus à ISAE-Supméca ont permis aux étudiants sans bagage technologique d'acquérir les connaissances et compétences acquises précédemment par les étudiants avec bagage technologique.

Nous observons un effet principal de la pratique de logiciels de modélisation antérieure aux enseignements d'ISAE-Supméca sur l'évolution à l'exercice de modélisation intra-sujet ($F(1,91) = 27,22 ; p < 0,001$) et inter-sujet ($F(1,91) = 28,38 ; p < 0,001$). Les étudiants avec et sans pratique des modélisateurs volumiques progressent significativement. Les étudiants sans pratique, dont la performance en moyenne marginale était plus faible que celle des étudiants avec pratique, semble progresser davantage et rattraper leurs pairs au second recueil. Ce résultat suggère que les enseignements reçus à ISAE-Supméca ont permis aux étudiants sans pratique de combler leurs lacunes. Le nombre d'étudiants sans pratique de logiciels de modélisation étant faible ($n = 11$), ce résultat est à prendre avec prudence.

Nos traitements mettent en évidence un effet principal du nombre de logiciels de modélisation antérieurs aux enseignements d'ISAE-Supméca sur l'évolution à l'exercice de modélisation intra-sujet ($F(4,87) = 7,09 ; p < 0,001$) et inter-sujet ($F(4,87) = 10,05 ; p < 0,001$). Les étudiants ayant pratiqué moins de logiciels de modélisation progressent significativement. Les étudiants sans pratique, dont la performance en moyenne marginale était la plus faible, semble progresser davantage et rattraper leurs pairs au second recueil. Le nombre d'étudiants sans pratique étant faible ($n = 11$), il est à prendre avec prudence. La performance en moyenne marginale est proche pour toutes les catégories à la seconde prise de données. Ces résultats suggèrent que la pratique antérieure aux enseignements reçus à ISAE-Supméca n'est pas

déterminante dans la performance en modélisation, après les enseignements du premier semestre, dont l'apprentissage de la modélisation volumique et la pratique du modèleur CATIA.

Nous relevons d'autre part des interactions significatives à plusieurs facteurs, i.e. formation et pratique de modèles volumiques antérieures, avec l'évolution de la performance en modélisation (effet intra-sujet : $F(1,91) = 21,29$; $p < 0,001$; effet inter-sujet : $F(1,91) = 23,23$; $p < 0,001$). Nous constatons que toutes les catégories progressent et que les étudiants de formation technologique et avec pratique antérieure de logiciels de modélisation ont très peu progressé ($M_1 = 32,58$, $ES_1 = 0,43$; $M_2 = 33,13$, $ES_2 = 0,27$). Ce sont les étudiants dont la moyenne était la plus élevée au premier recueil, dont la marge de progression est la plus faible.

Nous observons aussi une interaction significative entre la formation antérieure, le nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant les enseignements de l'école et l'évolution de la performance en modélisation (effet intra-sujet : $F(2,87) = 10,55$; $p < 0,001$; effet inter-sujet : $F(2,87) = 11,71$; $p < 0,001$). On constate des progressions faibles pour les étudiants de formation technologique avec pratique de modèles volumiques et des progressions fortes pour les étudiants sans bagage technologique et pas de pratique ou la pratique d'un seul logiciel de modélisation. Il serait intéressant d'étudier si la pratique de logiciels de modélisation est liée à la formation reçue avant de rejoindre l'école pour préciser ce lien.

24.4.3 Évolution en modélisation volumique et performance académique

Nous n'observons pas d'effet principal de la performance aux évaluations de MSOL, MAPP, PCAT, AMEC et ALGO sur l'évolution de la performance en modélisation. Autrement dit, nous ne pouvons établir de lien entre la maîtrise de ces apprentissages et une progression à l'exercice de modélisation. Ceci n'écarterait pas la possibilité que ces enseignements aient contribué à l'amélioration des scores, que soit individuellement ou collectivement.

Nous relevons d'autre part des interactions concernant la performance à deux ou trois enseignements du premier semestre et l'évolution

- au MRT avec les catégories de scores de PCAT et ALGO ($F(2,21) = 7,40$; $p = 0,004$), avec les scores de PACT et MAEC ($F(1,21) = 4,20$; $p = 0,053$), avec les scores de MAPP et ALGO ($F(2,21) = 5,17$; $p = 0,015$), avec les scores de MAPP, PCAT et ALGO ($F(1,21) = 7,20$; $p = 0,014$) ;
- au PSVT:V avec les catégories de scores de MSOL et AMEC ($F(1,15) = 4,73$; $p = 0,046$) ;
- au CFT avec les catégories de scores de PCAT et ALGO (CFT : $F(2,21) = 3,62$; $p = 0,045$).

24.4.4 Évolution en modélisation volumique et stratégies de modélisation

Davantage d'étudiants définissent la longueur totale de la pièce au second recueil ($p = 0,57$). Cette cote est indiquée dans une des trois vues données de la pièce à modéliser. Nous en concluons que les enseignements ont permis aux étudiants de prendre en considération plus d'informations dimensionnelles dans les représentations des objets qu'ils doivent modéliser.

24.4.5 Évolution en modélisation volumique et évolution des scores spatiaux

L'évolution de la performance en modélisation n'est pas liée à l'évolution des scores spatiaux. Nous ne pouvons pas établir de lien entre une amélioration d'une compétence spatiale spécifique, i.e. rotation mentale, transformation mentale, changement de point de vue, dissociation, et une amélioration de la performance en modélisation volumique. Ceci n'écarte pas la possibilité que l'amélioration de l'habileté spatiale, composée de la visualisation spatiale et de l'orientation spatiale, contribue à la progression des scores de modélisation. Cette piste pourrait être explorée en combinant les scores spatiaux en une variable unique.

24.4.6 Synthèse

Les étudiants ont progressé à l'exercice de modélisation, évalué à partir de critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels, à l'issue du premier semestre. Cette progression n'est pas seulement due à l'effet d'entraînement, elle est cependant dépendante du niveau initial. Un petit nombre d'étudiants restent décrochés.

Cette évolution n'est pas liée significativement à nos variables sociodémographiques, ni à la performance académique. À l'instar de l'évolution en performance spatiale, les enseignements semblent contribuer à la progression de la performance en modélisation, que les étudiants maîtrisent ces enseignements ou pas.

Cette progression s'accompagne d'une augmentation du nombre d'étudiants optant pour la définition de la longueur totale. Nous avons suggéré dans la synthèse portant sur la caractérisation de la performance en modélisation de notre échantillon que la capacité à contraindre cette cote était liée à la performance spatiale. L'augmentation significative du nombre d'étudiants définissant la longueur totale pourrait s'expliquer par une évolution des scores spatiaux au second recueil ou par la formation, dont la formation à la CAO, prodiguée par les enseignants d'ISAE-Supméca.

Nous observons en revanche des liens significatifs avec les variables liées à la formation reçue avant de rejoindre l'école d'ingénieurs, i.e. formation à contenu technologique, pratique de logiciels de modélisation, nombre de modeleurs volumiques pratiqués. Tous les étudiants progressent (à l'exception des étudiants ayant pratiqué trois logiciels de modélisation à la performance très élevée dès le premier recueil), mais les étudiants sans bagage technologique et les étudiants sans pratique des modeleurs, à la performance en moyenne marginale plus faible au premier recueil, progressent davantage que leurs pairs pour produire une performance proche au second recueil. Les enseignements suivis ont permis aux étudiants sans formation technologique ou à la modélisation préalable d'acquérir les connaissances et/ou compétences nécessaires à la réussite de notre exercice, évaluée selon nos critères géométriques, dimensionnels et fonctionnels.

24.5 Étude qualitative de l'activité de modélisation volumique à partir de l'encodage d'un échantillon de vingt-huit vidéos

Nous étudions l'activité de modélisation d'un échantillon de vingt-huit étudiants au travers des données produites par l'encodage des vidéos issues de la captation de leur activité à l'écran et du filmage de la partie supérieure de leur corps.

Nous retenons les résultats dont la significativité est inférieure à 0,1 pour cet échantillon restreint en raison de sa spécificité : les vingt-quatre étudiants retenus en vue du recueil 3 ont participé à toutes les expérimentations et sont donc d'une assiduité exemplaire. Les quatre autres étudiants dont les vidéos ont été encodées ont fait preuve de la même assiduité. Leur performance et leur motivation ne sont peut-être pas représentatives de l'ensemble de l'échantillon.

L'échantillon restreint n'a pas progressé significativement entre les deux prises de données. Les scores élevés, compris entre 32 et 35, concernent 82% des étudiants au premier recueil. Ils se resserrent autour des valeurs 33 et 35 au second et concernent 75% de l'échantillon restreint. Ce résultat confirme que cet échantillon restreint n'est pas représentatif de l'échantillon plus large, soit l'ensemble des étudiants qui ont participé aux deux relevés, qui a progressé significativement ($p < 0,001$).

Nous comparons nos résultats avec ceux de Lang *et al.* (1991), qui ont demandé à des experts et à des novices de réaliser un modèle filaire à partir de la vue de dessus et de la vue de côté cotées d'un objet. Les réalisations de quatre sujets, deux experts et deux novices, sont filmées puis encodées pour établir les séquences de modélisation dont ils vérifient la conformité avec la séquence optimale que les auteurs ont déterminée. Ceci leur permet d'identifier une stratégie orientée objet, chronophage, adoptée par un novice et un expert, et une stratégie orientée caractéristique, plus efficace, adoptée par un novice et un expert (p. 264). Nous allons à nouveau associer les résultats obtenus à la première prise de données à une performance novice, et ceux obtenus après le premier semestre d'enseignements à une performance experte.

Nous allons dans un premier temps aborder les hypothèses liant performance globale et indicateurs de stratégie, puis celles liant performance globale et indicateurs de performance spécifiques.

24.5.1 Indicateurs de stratégie

L'évolution du nombre d'actions entre les deux prises de performance est très faiblement significative ($p = 0,089$). Les étudiants semblent réaliser leur modélisation en un nombre plus faible d'actions au second recueil, de même que les experts de l'étude Lang *et al.* (p. 260), malgré une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Il est possible que la pratique du modèleur volumique CATIA leur ait permis d'acquérir des stratégies de modélisation, i.e. des connaissances procédurales, plus économes en actions, transférables à la plateforme Onshape.

Le lien entre performance et nombre d'actions n'est significatif ni pour le premier recueil ($\chi^2(2) = 1,84$; $p = 0,399$), ni pour le second recueil ($\chi^2(2) = 3,66$; $p = 0,161$). Ce résultat peut être expliqué par le fait que certains étudiants adoptent des stratégies plus ou moins économes en actions, sans que cela affecte la justesse de leur réalisation (Lang *et al.*, 1991, p. 264).

Le lien entre performance et nombre d'actions avortées n'est pas significatif pour le premier recueil ($\chi^2(2) = 2,86$; $p = 0,239$) et très faiblement significatif pour le second ($\chi^2(2) = 4,77$; $p = 0,092$). La performance en modélisation semble plus élevée au deuxième recueil pour les étudiants qui avortent un nombre modéré ou faible d'actions. Il est possible que les étudiants obtenant des scores de modélisation plus élevés se repèrent mieux dans l'environnement du logiciel ou qu'ils aient une stratégie de modélisation plus déterminée.

Le lien entre performance et nombre d'actions factorisées n'est significatif ni pour le premier recueil ($\chi^2(2) = 2,55$; $p = 0,280$), ni pour le second recueil ($\chi^2(2) = 1,51$; $p = 0,470$). Le regroupement d'actions de même nature limite le nombre d'opérations. Ce résultat non-significatif correspond à celui relatif au nombre d'actions qui n'est pas lié à la performance : l'objet peut être réalisé avec justesse selon des stratégies plus ou moins économes en actions (Lang *et al.*, 1991, p. 264).

24.5.2 Indicateurs de performance

Le lien entre performance et nombre de messages d'erreur n'est pas significatif pour le premier recueil ($\chi^2(2) = 2,65$; $p = 0,265$) et très faiblement significatif pour le second ($\chi^2(2) = 5,28$; $p = 0,071$). La performance en modélisation semble plus élevée au deuxième recueil pour les étudiants qui génèrent un nombre modéré ou faible de messages d'erreur. Lang *et al.* définissent comme erreurs les erreurs de syntaxe relevées par l'ordinateur et les associent au savoir déclaratif. Ils constatent que les novices font deux fois plus d'erreurs que les experts. Les messages d'erreurs générés dans Onshape, relevés dans les vidéos, concernent les contraintes contradictoires, e.g. impossibilité d'attribuer deux rayons différents au même cercle, et les options d'extrusion, i.e. extrusion dirigée à l'extérieur du volume. Le résultat faiblement significatif ne permet pas d'affirmer que les étudiants commettent moins d'erreurs après avoir reçu des enseignements en modélisation volumique. Nous ne pouvons davantage déterminer si ces erreurs sont dues à un manque de familiarité avec la plateforme Onshape ou à des erreurs de modélisation.

Le lien entre performance et temps de réalisation n'est significatif ni pour le premier recueil ($\chi^2(2) = 3,21$; $p = 0,201$), ni pour le second ($\chi^2(2) = 3,99$; $p = 0,136$). Ce résultat montre que le temps n'est pas un indicateur de réussite. Les étudiants réalisent leur modélisation significativement plus vite au second recueil ($p = 0,005$), malgré une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Cette amélioration peut s'expliquer par un apprentissage de stratégies de modélisation efficaces qui seraient applicables quel que soit le modèleur utilisé, soit des connaissances procédurales. Ceci est conforme aux résultats de l'étude de Lang *et al.* qui observent que les experts de leur expérience sont plus rapides (p. 260). Le temps de réalisation semblerait donc être un indicateur d'expertise.

Malgré une diminution significative du temps de réalisation et une diminution faiblement significative du nombre d'actions, les étudiants ne sont pas plus efficaces au deuxième recueil qu'au premier ($p = 0,186$). Lang *et al.* définissent l'efficacité en fonction des retours en arrière durant la réalisation de la pièce (p. 262) et concluent que la stratégie orientée fonction est plus efficace que la stratégie orientée objet. Notre encodage ne permet pas de vérifier la conformité de notre échantillon avec le constat de Lang *et al.*

Après avoir établi que les étudiants n'étaient pas plus efficaces au second recueil, nous avons souhaité expliquer ce résultat à partir de variables disponibles à partir de notre encodage. L'augmentation d'actions de tâtonnement à la deuxième prise de données est significative ($p = 0,031$). Les étudiants réalisent significativement plus de déplacements sans but précis et d'explorations de menus au second recueil, après une absence de pratique de la plateforme Onshape de plusieurs mois. Nous pourrions retirer les actions de tâtonnement du nombre total des actions et effectuer un nouveau test du signe pour vérifier si le nombre d'actions diminue significativement au second recueil. Dans ce cas, la probabilité que le manque de pratique de

la plateforme Onshape, et donc le manque de connaissances déclaratives, pourrait expliquer l'augmentation du nombre d'actions de tâtonnement.

24.5.3 Synthèse

L'échantillon restreint ($N = 28$) dont nous avons encodé les vidéos n'est pas représentatif des étudiants ayant participé aux deux prises de performance de la modélisation : leurs scores n'évoluent pas significativement. Les étudiants ont été choisis pour le recueil 3 de manière à obtenir un échantillon pour lequel toutes les variables étaient disponibles. Cette sélection présente le possible biais du choix d'un échantillon d'étudiants assidus, dont la motivation et/ou le niveau de performance sont peut-être particuliers.

La performance en modélisation au premier recueil de ces sujets n'est pas liée aux variables que nous avons retenues, qu'elles concernent la performance i.e. nombre d'erreurs et temps de réalisation, ou la stratégie de modélisation, i.e. nombre d'actions, nombre d'actions avortées, nombre d'actions factorisées. La justesse de leur réalisation n'est pas liée à une économie d'actions ou de temps de réalisation au premier recueil.

Le second recueil a eu lieu après que les étudiants ont reçus des enseignements dédiés à l'apprentissage de la modélisation volumique. À la différence du premier recueil, on observe un lien très faiblement significatif entre la justesse de la réalisation et le nombre d'erreurs, ainsi qu'entre la justesse de la réalisation et le nombre d'actions avortées. Les plus faibles performances sont produites par des étudiants dont le nombre d'erreurs et le nombre d'actions avortées sont élevés. Il semblerait que les meilleurs étudiants au second recueil adoptent une stratégie de modélisation plus sûre et plus directe.

Au second recueil, les étudiants, quel que soit leur niveau de performance, réalise l'exercice plus vite et en produisant en moins d'actions. Leur efficacité n'évolue pas significativement pour autant. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'ils tâtonnent significativement plus au second recueil, après avoir reçu une formation à la modélisation sur un modèleur différent de celui utilisé dans notre expérimentation. Les connaissances procédurales sont transférables à d'autres logiciels, à la différence des connaissances déclaratives.

Chapitre 25. Limites et perspectives

Nous allons décrire dans ce chapitre les limites de ce travail dues au contexte de la recherche et à nos choix méthodologiques. Nous abordons d'une part les spécificités de notre terrain et de nos collectes de données, puis les traitements que nous avons effectués. Nous traitons dans un deuxième temps les perspectives de recherche suite à ces premiers travaux exploratoires.

25.1 Limites

25.1.1 Terrain et contexte

Les étudiants d'ISAE-Supméca sont très largement issus de classes préparatoires aux grandes écoles, dont l'accès est limité par sélection. Les étudiants ont de plus été recrutés par concours pour rejoindre l'école d'ingénieurs. Ces caractéristiques confèrent à notre échantillon une particularité quant à leur formation et leur niveau de compétences dans les disciplines scientifiques. Nous remarquons que la distribution des scores des étudiants à quatre tests spatiaux et à l'exercice de modélisation ne respecte pas la loi normale à leur arrivée à l'école.

Ces étudiants sont majoritairement de sexe masculin. La pratique des loisirs étant liée au genre (Octobre, 2008), notre étude des liens entre habileté spatiale et pratique de loisirs peut avoir été biaisée par une faible représentation de certains loisirs.

Les deux premières prises de données ont eu lieu à l'arrivée des étudiants et à la fin du premier semestre. La deuxième collecte a eu lieu dans un contexte de grèves de transports et durant la période d'examens. La participation des étudiants n'étant pas obligatoire, l'effectif de notre échantillon a diminué avec le temps. Sa taille en est limitée et nous ne pouvons pas écarter la possibilité que les étudiants qui ont participé à toutes les expérimentations, tels les vingt-huit étudiants dont nous avons encodé les vidéos, soient caractérisés par une motivation particulière.

25.1.2 Protocole de collecte des données

L'ordre des tests spatiaux a été déterminé de manière à limiter l'effet des tests pour lesquels le recours à une stratégie analytique est plus probable, d'après nos premières expérimentations, sur les tests suivants. Cependant, l'effet d'ordre²⁴ que nous avons voulu éviter a pu en créer un autre (Kinnear et Gray, 2015, p. 241) : cet ordre a pu aussi bien mener à des effets d'apprentissage influençant les stratégies de résolution adoptées dans les tests suivants, que créer une fatigue ou une lassitude qui aurait affecté la performance des tests situés en fin de batterie (American Psychological Association, 2022a; Kinnear et Gray, 2015, p. 241; Schwartz, 1963, p. 684). Inversement, le placement du PSVT:V en début de batterie a pu affecter la performance à ce test, qui aurait servi de mise en activité.

Le choix des réponses possibles dans les QCM Stratégies a limité le nombre et la nature des réponses concernant les stratégies mobilisées dans les tests. Cette méthode ne nous permet pas

²⁴ « *in within-subjects designs, the influence of the order in which treatments are administered, such as the effect of being the first administered treatment (rather than the second, third, and so forth). As individuals participate in first one and then another treatment condition, they may experience increased fatigue, boredom, and familiarity with or practice with reacting to the independent variable. Any of these conditions could affect the participants' responses and confound the results of the study* » (American Psychological Association, s.d.a) .

non plus de déterminer si une stratégie est appliquée à l'ensemble des questions, ou si la stratégie choisie est utilisée seule ou combinée à une autre.

De même, le choix des questions retenues pour les questionnaires ouverts Stratégies a pu limiter le recensement des stratégies mobilisées dans les tests : les questions choisies n'ont permis d'identifier que les stratégies mobilisées dans ces questions. D'autres stratégies ont pu être adoptées pour d'autres questions, comme en témoignent certains verbatim. D'autre part, la qualité du recueil des données au travers d'un questionnaire ouvert est dépendant de la capacité des sujets à expliciter et décrire verbalement des procédés mentaux, ce pour quoi ils n'ont pas été formés, (Bloom et Broder, 1950, p. 23). Ceci pose aussi la question de leur capacité à utiliser la représentation qu'est le langage pour « accéder à leur représentation de la tâche et à leur planification de la résolution » (Pilardeau, 2008, p. 19).

De plus, la longueur de l'expérimentation a pu causer de la lassitude et le bâclage de certaines réponses du questionnaire ouvert Stratégies. Nous pourrions analyser le nombre de recours aux réponses encodées Réponse Identique (RI) pour chaque test, pour vérifier si ce nombre augmente en fin de questionnaire.

Les questionnaires Loisirs ont limité les réponses des étudiants aux choix que nous leur avons proposés. Le questionnaire concernant l'âge adulte en particulier a produit des catégories de pratique fréquente à faibles effectifs. Les loisirs que nous avons proposés aux étudiants n'étaient peut-être pas assez proches de leur pratique.

L'enregistrement des activités de modélisation a été réalisé via un double dispositif : la captation de l'activité à l'écran et le filmage de la partie supérieure du corps. Malgré un tutoriel d'accompagnement, des enregistrements n'ont pas été réalisés quand les étudiants n'ont pas respecté la procédure. Nous avons aussi observé des enregistrements à partir de la webcam de moindre qualité quand les étudiants ont mal positionné la caméra ou qu'elle a été déplacée pendant l'enregistrement. Une analyse FFOM du protocole d'enregistrement se trouve en annexe dans le tableau A43.

25.1.3 Traitement des données

Dans le traitement des réponses données dans les questionnaires, nous avons procédé à des regroupements de réponses afin de créer des catégories suffisamment importantes pour permettre les traitements statistiques. Ces regroupements ont mené à des pertes d'informations, qu'il serait intéressant de reprendre de façon détaillée dans des études à plus petite échelle.

L'encodage des vidéos n'a pas permis de recréer l'historique de conception de la pièce et de mettre à jour la séquence de modélisation, dont les allers-retours, les abandons ou les itérations. De même, bien que nous ayons un indicateur du nombre de suppressions, nous ne savons pas ce que ces suppressions concernent. Cet encodage étant chronophage, nous n'avons encodé que vingt-huit étudiants pour lesquels nous possédions l'ensemble des données, les limites de cet échantillon ayant été soulevées dans le paragraphe relatif au terrain.

25.2 Perspectives

De nouvelles analyses pourraient être menées à partir des données que nous avons collectées afin de préciser certains résultats ou explorer de nouvelles pistes de recherche. Ainsi, afin de

spécifier nos résultats relatifs au genre et à la formation, de nouvelles hypothèses pourraient être testées concernant le lien entre :

- genre et pratique de loisirs ;
- genre et formation antérieure ;
- pratique de modeleurs volumiques et formation antérieure.

Comme abordé dans la partie consacrée aux limites de cette étude, le regroupement de certaines réponses a mené à une perte d'informations concernant notamment les stratégies de résolution adoptées dans les tests spatiaux. Il serait intéressant de reprendre les verbatim mentionnant le positionnement des stimuli par rapport au repère x y z et de créer une catégorie spécifique pour investiguer l'efficacité de cette stratégie. De même, pour les étudiants mentionnant avoir recours aux gestes pour répondre aux questions.

Nos traitements n'ont pas exploré l'évolution des stratégies de résolution adoptées dans les tests spatiaux entre les deux prises de performance. Il serait intéressant de vérifier les résultats obtenus sur le premier recueil pour le second, de voir si et quel changement de stratégies ont eu lieu, ainsi que l'effet de ce changement sur la performance au second recueil.

L'étude des items les plus réussis, des items les moins bien réussis et des items qui ont obtenu le moins de réponses permettrait d'identifier les forces et difficultés des étudiants quant aux problèmes spatiaux. Ce travail a été amorcé dans une étude comparant les difficultés communes à notre échantillon et à un échantillon sénégalais, composé de 131 étudiants de niveau bac+2, issus de l'École Supérieure Polytechnique et de l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technique et Professionnel de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, pour les tests de visualisation spatiale MRT et MCT (Charles et Agbanglanon, 2022). Il pourrait être étendu à l'ensemble des tests utilisés dans notre protocole pour les deux prises de données et à l'exploration d'une éventuelle évolution entre les deux prises de données.

De nouveaux encodages des vidéos seraient utiles pour décrire les séquences d'actions réalisées lors de l'exercice de modélisation. Nos encodages nous ont permis de repérer des indicateurs de l'activité des étudiants mais pas d'en décrire l'articulation avec les objets créés. Ce séquençage nous permettrait de retracer l'historique de la modélisation au travers de représentations graphiques comme dans l'étude de l'étude Lang *et al.* (1991, p. 264) ou d'entreprendre des analyses de séquence.

Le filmage de la séquence de travail de groupe dans le cadre du cours PRIM- DIM n'a pas été exploité en raison de l'organisation coopérative adoptée par les étudiants, alors que nous souhaitions explorer les échanges portant sur des problèmes spatiaux de modélisation 3D. Les travaux de Cosnefroy et Jézégou (2013) et Bellet, Vendeville et Mailles-Viard Metz (2019) offrent cependant des pistes de recherche prometteuses pour l'exploitation de ces données. Ces deux études portent sur le sentiment d'efficacité collectif (Bandura, 1997), soit « la croyance partagée par les membres du groupe dans leur capacité à collaborer pour organiser et exécuter les actions requises pour atteindre un résultat désiré » (p. 477), de groupes d'étudiants impliqués dans des apprentissages fondés sur le travail de groupe. Les deux études évaluent ce sentiment au travers d'un questionnaire portant sur des critères de recours à des ressources, de buts, et d'interactions. Il nous semble que ces critères pourraient être repris et adaptés pour constituer une grille d'encodage de nos vidéos. Les variables identifiées pourraient être mises en regard avec les scores spatiaux des étudiants pour caractériser une éventuelle relation entre ces aspects

de l'activité des groupes et de leurs membres et l'habileté spatiale des membres, ainsi que l'habileté spatiale du groupe, qui pourrait être déterminée à partir des scores individuels.

Finalement, nous avons souligné plusieurs fois au cours de ce manuscrit la particularité de notre terrain : nos sujets sont des apprenants spécialisés, issus de filières sélectives et majoritairement de sexe masculin. Les résultats que nous avons décrits sont limités par leurs caractéristiques et invitent à explorer d'autres terrains, moins spécifiques. La spécialisation des élèves s'effectuant à la fin du collège, la mise à échelle de notre protocole auprès d'un public de jeunes collégiens permettrait de préciser les résultats que nous avons observés concernant le lien entre performance spatiale et stratégies de résolution, et d'explorer les éventuelles relations entre ces processus cognitifs et les caractéristiques individuelles auprès d'un terrain plus naïf.

Conclusion

Ce travail de thèse a pour objectif de qualifier la performance et l'activité dans des tâches spatiales d'étudiants ingénieurs en première année d'études à plusieurs moments de leur formation. Cette investigation est menée au travers de deux expérimentations, déployées à l'arrivée des étudiants et après qu'ils ont suivi un semestre d'enseignements, et de l'observation d'une activité de groupe dans un cours du deuxième semestre. La première expérimentation a porté sur la mesure des habiletés spatiales au travers de cinq tests spatiaux, le recueil des stratégies mobilisées dans ces tâches au travers de questionnaires et l'identification des loisirs pratiqués par nos sujets grâce à des questionnaires. La deuxième a concerné l'enregistrement de l'activité lors d'un exercice de modélisation volumique individuel. L'observation de l'activité d'équipes d'étudiants engagés dans une tâche de dimensionnement de mécanisme en groupe a été réalisée grâce à la captation de leur activité individuelle et du filmage du groupe.

Nos questionnements portent sur la relation entre performance dans des tests visant à mesurer l'habileté spatiale et caractéristiques individuelles, le lien entre performance en modélisation et caractéristiques individuelles, la relation entre les éventuelles évolutions en performance et stratégies en habileté spatiale et modélisation volumique suite à des enseignements, et le potentiel lien entre ces évolutions. Nous nous intéressons finalement aux échanges portant sur des problèmes spatiaux dans une activité de dimensionnement de mécanisme réalisée en groupe.

❖ Habileté spatiale : performance et stratégie

La mise en regard de la performance spatiale des étudiants à leur arrivée en études d'ingénieur avec les données sociodémographiques que nous avons recueillies montre que la pratique de loisirs dynamiques, manipulatoires et, dans de moindres mesures, de loisirs de construction et de loisirs en 2D, dans l'enfance et l'adolescence est liée à la performance spatiale. C'est-à-dire qu'il semblerait que la pratique fréquente de ces catégories de loisirs soit favorable au développement de l'habileté spatiale. De même, nous observons que la pratique de modèles volumiques soit bénéfique à l'acquisition de compétences spatiales. Ces résultats sont conformes à la littérature qui établit des liens entre performance spatiale et pratique de loisirs (Feng *et al.*, 2007, p. 853; Gold *et al.*, 2018, p. 10; Moreau *et al.*, 2012, p. 86), d'une part et performance spatiale et pratique de modèles volumiques d'autre part (Górska et Sorby, 1998, cité dans Sorby, 1999b). Ces résultats invitent à explorer le lien que la pratique de loisirs et d'outils de modélisation entretient avec le genre pour éclairer la relation entre la performance spatiale à deux tests et le genre. Des prolongations de recherche avec des effectifs plus importants permettraient de venir interroger ces remarques. Nous observons aussi un lien entre le nombre de langues maternelles apprises et la performance spatiale : un relevé systématique du lieu de formation post-bac permettrait d'explorer la relation entre performance spatiale et lieu de formation post-bac, qui pourrait expliquer le lien entre performance spatiale et nombre de langues maternelles apprises. Nous ne constatons en revanche pas de lien significatif entre performance spatiale et prévalence manuelle, niveau d'anglais ou encore formation antérieure.

Notre travail s'est efforcé de caractériser l'activité d'apprenants engagés dans la résolution de problèmes spatiaux. Il a souligné la différence entre le but à atteindre et les conditions qui s'y rapportent, tels que définis dans les tâches, et ce que les étudiants ont effectivement mis en œuvre pour atteindre ce but (Leplat, 2004, p. 204). Il a, par extension, attiré l'attention sur les limites des tests spatiaux, qui ne donnent à montrer que le produit de l'activité. Conformément à la littérature (Albaret et Aubert, 1996; Barratt, 1953; P. E. Eme et Marquer, 1998; Hegarty,

2018; Just et Carpenter, 1984; Lohman et Kyllonen, 1983; Pilardeau, 2008; Tsutsumi *et al.*, 1999), notre recherche indique que plusieurs stratégies sont mises en œuvre dans les tests spatiaux, que les étudiants changent de stratégie et que certaines stratégies sont plus efficaces dans le cas du MCT et du CFT. De plus, la flexibilité stratégique observée est bénéfique dans le cas du MRT, du MCT et du CFT. Ceci invite à la prudence lors de l'interprétation des scores obtenus par ces outils de mesure qui ne donnent à voir non pas la maîtrise d'une compétence spécifique, dans notre cas la rotation mentale, la transformation mentale, le changement de point de vue et la dissociation, mais celle d'une compétence à résoudre des problèmes dans des tâches visant à mobiliser cette compétence. Par extension, ils invitent à être prudent dans la conception de dispositifs pédagogiques de remédiation sur la base de ces scores. Si l'on utilise ces outils de mesure comme outils de diagnostic, sans investiguer les stratégies qui y sont déployées et sans vérifier l'efficacité de ces dernières, on prend le risque de mettre en place des dispositifs de remédiation qui visent à développer des stratégies peu pertinentes.

❖ Modélisation volumique : performance et stratégie

L'analyse des modélisations réalisées par les étudiants à leur arrivée à l'école montre des différences de performance et de stratégies de modélisation. La mise en regard de la performance en modélisation des étudiants à leur arrivée en études d'ingénieur avec la performance spatiale montre une corrélation faible mais significative entre les scores de modélisation et les scores spatiaux. Il semblerait que la compétence en visualisation et en orientation spatiales soient utiles pour modéliser des objets virtuels 3D à partir de représentations 2D, en suivant l'articulation imposée par le fonctionnement de notre modèleur volumique : création d'une esquisse puis ajout de la troisième dimension. Cette habileté spatiale s'avère aussi utile pour définir la longueur totale et la symétrie de la pièce. Elle n'a cependant pas de lien avec la stratégie de perçage et le nombre d'esquisse ou d'extrusions, indicateurs de la stratégie globale de création de l'objet. Ces résultats suggèrent que l'habileté spatiale est avant tout utile dans la définition géométrique de la pièce, plutôt que dans la stratégie de création de la pièce, telle que nous l'avons évaluée. Nous remarquons qu'un test d'orientation spatiale, le CFT, semble être particulièrement lié à la performance en modélisation, alors que les études précédentes se sont intéressées aux tests de visualisation spatiale (Branoff et Dobelis, 2012a; Hamlin *et al.*, 2006; Sorby, 1999b; Steinhauer, 2012). La capacité à dissocier un élément intriqué dans un motif complexe semble être déterminante dans la capacité à modéliser une pièce.

La mise en regard de la performance spatiale des étudiants à leur arrivée en études d'ingénieur avec les données sociodémographiques que nous avons recueillies montre une relation significative entre performance en modélisation et formation à contenus technologiques d'une part, et entre performance en modélisation et pratique de modèles volumiques d'autre part. Nous ne constatons en revanche aucun lien entre cette performance et le genre, la prévalence, manuelle, le niveau d'anglais, le nombre de langues maternelles apprises et la pratique de loisirs. Ces résultats suggèrent que les compétences en modélisation s'acquièrent au travers de formations spécifiques.

❖ Habileté spatiale : évolution de la performance à l'issue d'un semestre d'enseignements

La répétition de notre protocole permet d'identifier les évolutions en performance et en stratégies consécutives aux enseignements reçus au premier semestre. Dans le cas des performances spatiales, nous constatons une progression significative aux cinq tests spatiaux,

évolution bien supérieure à l'effet d'entraînement pour quatre d'entre eux. Nous en concluons que les enseignements ont contribué à cette progression, bien que nous ne trouvions pas de lien entre la maîtrise de ces apprentissages et cette progression. Il se peut qu'elle soit due à un ensemble d'enseignements ou à la maîtrise d'enseignements dont nous n'avons pas obtenu les évaluations. Cette progression est néanmoins liée au niveau initial des étudiants qui semble la limiter : les étudiants progressent, mais les écarts sont maintenus.

Conformément aux résultats d'Uttal *et al.* (2013, p. 364), nous ne constatons pas d'évolution liée au genre en ce qui concerne le R PSVT:R, le MCT et le CFT. Ce n'est pas le cas pour le PSVT:V et le MRT, pour lesquels les femmes progressent davantage. Ces deux tests mobilisent majoritairement la stratégie de rotation mentale. De nouvelles études portant sur le lien entre stratégie de résolution et genre pourraient préciser davantage ce résultat. Nous observons de plus une évolution en performance au PSVT:V liée à la performance initiale, comme c'est le cas dans la méta-analyse d'Uttal *et al.* (2013, p. 367) qui montrent une plus forte progression pour les sujets plus faibles. Les étudiants ayant appris deux langues maternelles, ceux aux scores de TOEIC plus faibles et les femmes progressent davantage. Ce n'est pas le cas pour l'évolution au R PSVT:R qui est caractérisée par une évolution plus forte pour les étudiants dont la performance initiale était plus élevée, soit les étudiants ayant appris une langue maternelle. Ce n'est pas le cas non plus, pour le MCT et le CFT pour lesquels, les étudiants avec et sans pratique de modeleurs volumiques progressent de manière homogène.

Nous constatons des liens significatifs entre évolution de la performance au MRT, au MCT et au CFT et pratique de loisirs dans l'enfance et l'adolescence. Les effectifs faibles de nos catégories et les différences de progressions constatées rendent cependant l'interprétation de ces résultats difficiles. Il en est de même pour les loisirs pratiqués à l'âge adulte. Des prolongations de recherche avec des effectifs plus importants permettraient de venir interroger ces résultats.

❖ Modélisation volumique : évolution de la performance à l'issue d'un semestre d'enseignements

Nous constatons une progression significative à l'exercice de modélisation, évolution bien supérieure à l'effet d'entraînement. Cette progression est néanmoins liée au niveau initial des étudiants. Nous en concluons que les enseignements ont contribué à cette progression, bien que nous ne trouvions pas de lien entre la maîtrise de ces apprentissages et cette progression. Il se peut qu'elle soit due à un ensemble d'enseignements ou à la maîtrise d'enseignements dont nous n'avons pas obtenu les évaluations. De même que pour la performance spatiale, la progression en modélisation est liée au niveau initial des étudiants : les étudiants progressent, mais les écarts sont maintenus.

Nous observons une relation significative entre progression en modélisation et formation antérieure d'une part et pratique de logiciels d'autre part. Dans les deux cas, les étudiants aux scores plus faibles à la première prise de données, soit les étudiants sans bagage technologique et/ou sans pratique des modeleurs volumiques, progressent davantage et rattrapent leurs pairs. Ceci suggère que les enseignements reçus à ISAE-Supméca ont permis aux étudiants d'atteindre un niveau de performance équivalent, telle que mesurée selon nos critères, quel que soit leur bagage en technologie ou en pratique des modeleurs volumiques.

De même que pour la performance initiale, nous n'observons pas de lien significatif entre l'évolution de la performance en modélisation et le genre, la prévalence manuelle, le nombre

de langues maternelles apprises, le niveau d'anglais et la pratique de loisirs. Nous obtenons aussi un résultat non significatif concernant l'évolution de la performance en modélisation et l'évolution de la performance aux tests spatiaux. Existe-t-il un lien entre évolution en modélisation et évolution en performance spatiale globale ? De nouveaux tests statistiques sont nécessaires pour préciser ce résultat.

Nous constatons une évolution de la stratégie de la définition de la longueur totale : au second recueil, davantage d'étudiants définissent cette cote. Ceci peut être dû à une évolution de la performance spatiale ou encore aux enseignements reçus au premier semestre, qui ont inclu une formation à la CAO.

❖ Activité de modélisation volumique, performance et stratégie

Les résultats que nous obtenons, dont la significativité est faible, concerne un échantillon restreint de vingt-huit sujets, dont la performance n'est pas représentative de l'échantillon élargi. Ils suggèrent pourtant des pistes intéressantes qui mériteraient d'être approfondies grâce à l'encodage des vidéos d'un échantillon plus large.

L'analyse de l'activité des vingt-huit étudiants, dont nous avons encodé les vidéos, semble indiquer que la performance en modélisation n'est pas liée au nombre d'actions, au regroupement d'actions, ni au temps de réalisation. Autrement dit, des stratégies de modélisation économes ou chronophages sont efficaces pour produire la pièce selon les critères de justesse que nous avons déterminés (Lang *et al.*, 1991, p. 264).

Nous remarquons après un semestre d'enseignements, un très faible lien entre performance et nombre d'actions avortées d'une part et nombre d'erreurs d'autre part. Nous suggérons qu'après avoir été formés à la modélisation volumique, les étudiants qui performant mieux sont à la fois plus directs dans leur stratégie de modélisation et moins enclins à générer des sur-contraintes ou des erreurs liées à l'extrusion.

À la deuxième prise de données, les étudiants réalisent leur exercice de modélisation plus rapidement, en un nombre d'actions plus faible, mais ne sont pas plus efficaces pour autant. Une observation du nombre d'actions de tâtonnement suggère que la pratique d'un autre modeleur volumique a entraîné un manque de familiarité avec le modeleur que nous avons choisi pour notre expérimentation. Conformément à la revue de littérature (Hamade *et al.*, 2005, p. 306; Lang *et al.*, 1991, p. 258), nous en concluons que les connaissances procédurales, relatives aux stratégies de modélisation, sont communes à tous les outils de modélisation volumique, à la différence des connaissances déclaratives, relatives à la maîtrise d'un outil spécifique.

Bibliographie

- Adam, F., Jamart, J. F., Petitjean, S., Tummarello, S., et Bourbion, M. (2013). Boîte à cubes. Dans F. Clerc (dir.), *La troisième dimension. Voir et concevoir l'espace*. IREM de Paris Nord. http://www-irem.univ-paris13.fr/site_spip/spip.php?article347
- 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>
- Agence nationale de la recherche. (2011). *Initiatives D'Excellence en Formations Innovantes (IDEFI) - Appel à projets – 2011*. <https://anr.fr/en/call-for-proposals-details/call/appe-la-projets-initiatives-dexcellence-en-formations-innovantes-idefi/>
- Albaret, J. M., et 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.
- American Psychological Association. (s.d.). Power test. Dans *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/power-test>
- American Psychological Association. (s.d.). Order effect. Dans *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/order-effect>
- American Psychological Association. (s.d.). Strategy. Dans *APA Dictionary of Psychology*. <https://dictionary.apa.org/strategy>
- Anderson, J. R. (2014). *Rules of the Mind*. Psychology Press.
- Audy, J.-J. (1990). Conception assistée par ordinateur. *Techniques de l'ingénieur*, H65701-H657010.
- Ault, H. K., et Fraser, A. (2012). Use of technology solutions to improve CAD instruction. *Engineering Design Graphics Journal*, 76(3), 26-31.
- Ault, H. K., et John, S. (2010). Assessing and Enhancing Visualization Skills of Engineering Students in Africa: A Comparative Study. *Engineering Design Graphics Journal*, 74(2), 12-20.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W. H. Freeman.
- Barr, R. E. (2012). Engineering Graphics Educational Outcomes for the Global Engineer. Dans *66th EDGD Mid-Year Conference Proceedings*, 109-125.
- Barratt, E. S. (1953). An analysis of verbal reports of solving spatial problems as an aid in defining spatial factors. *The Journal of Psychology*, 36, 17-25.
- Bellet, P., Vendeville, N. et Mailles-Viard Metz, S. (2019). Les effets du travail de groupe sur les sentiments d'efficacité personnelle et collective en contexte d'apprentissage. *Canadian Journal of Education / Revue canadienne de l'éducation*, 42(4), 992-1021.
- Bennett, G. K., Seashore, H. G., et Wesman, A. G. (1947). *Differential aptitude tests*. Psychological Corporation.
- Bennett, G. K., Seashore, H. G., et Wesman, A. G. (1973). *Differential Aptitude Tests, Forms S and T*.
- Berkowitz, M., Gerber, A., Thurn, C. M., Emo, B., Hoelscher, C; et Stern, E. (2021). Spatial Abilities for Architecture: Cross Sectional and Longitudinal Assessment With Novel and Existing Spatial Ability Tests. *Frontiers in Psychology*, 11, 609363.
- Bertoline, G. R., Hartman, N., et Adamo-Villani, N. (2009). Computer-Aided Design, Computer-Aided Engineering, and Visualization. Dans *Springer Handbook of Automation* (p. 639-652). Springer.
- Bertoline, G. R., Wiebe, E. N., Hartman, N. W., et Ross, W. A. (2009). *Technical graphics communications* (4e éd.). McGraw-Hill Higher Education.

- Bienvenue, A. (2008). *Auto Multiple Choice* (version 1.3.0) [logiciel]. <https://www.auto-multiple-choice.net/index.fr>
- Binet, A., et Simon, T. (1907). Le développement de l'intelligence chez les enfants. *L'Année psychologique*, 14(1), 1-94.
- Bloom, B. S., et Broder, L. J. (1950). Problem-solving processes of college students. *Supplementary Educational Monographs*, B, 109-109.
- Bodner, G., et Guay, R. B. (1997). The Purdue Visualization of Rotations Test. *The Chemical Educator*, 2(4), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00897970138a>
- Bölcskei, A., Kovács, A. Z., et Kušar, D. (2013). New Ideas in Scoring the Mental Rotation Test. *YBL Journal of Built Environment*, 1(1), 59-69. <https://doi.org/10.2478/jbe-2013-0004>
- Bond, G. L., et Miller, J. (1947). Basic Tests for Officer Personnel. Dans D. B. Stuit (dir.). Dans *Personnel Research and Test Development in the Bureau of Naval Personnel* (p. 84-111). Princeton University Press.
- Box, G. E. P. (1949). A General Distribution Theory for a Class of Likelihood Criteria. *Biometrika*, 36(3/4), 317-346. <https://doi.org/10.2307/2332671>
- Branoff, T. (2000). Spatial Visualization Measurement: A Modification of the Purdue Spatial Visualization Test - Visualization of Rotations. *Engineering Design Graphics Journal*, 64(2), 14-22.
- Branoff, T., et Dobelis, M. (2012a). Engineering Graphics Literacy: Measuring Students' Ability to Model Objects from Assembly Drawing Information. Dans *Proceedings of the 66th Midyear Conference of the Engineering Design Graphics Division of the American Society for Engineering Education*, 41-. <https://doi.org/10.18260/1-2--21306>
- Branoff, T., et Dobelis, M. (2012b). 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.
- Brown, P. (2009). Do computers aid the design process after all? *Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology, and Society*, 2(1), 52-66.
- 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.
- Butler, P. D., Schechter, I., Revheim, N., Silipo, G. et Javitt, D. C. (2010). Has an important test been overlooked? Closure flexibility in schizophrenia. *Schizophrenia research*, 118(1-3), 20-25. [10.1016/j.schres.2010.01.005](https://doi.org/10.1016/j.schres.2010.01.005)
- Caisse des Dépôts. (2015). *Appel à projets e-FRAN* [appel à projets].
- Caissie, A. F., Vigneau, F., et 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>
- Caldera, Y. M., McDonald Cup, A., O'Brien, M., Truglio, R. T., Alvarez, M., et Huston, A. C. (1999). Children's Play Preferences, Construction Play with Blocks, and Visual-spatial Skills: Are they Related? *International Journal of Behavioral Development*, 23(4), 855-872. <https://doi.org/10.1080/016502599383577>
- Caro, S. (2004). *Conception Robuste de Mécanismes* [thèse de doctorat, École Centrale de Nantes (ECN), France]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00078374>
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge University Press.
- Chandrasekharan, S., Athreya, D., et Srinivasan, N. (2010). Investigating prospective control: When and how actions supporting cognition are generated. *International Journal of Mind, Brain and Cognition*, 1, 93-114.

- Chang, Y. (2014). 3D-CAD effects on creative design performance of different spatial abilities students. *Journal of Computer Assisted Learning*, 30(5), 395-407.
- Charles, S., et Agbanglanon, S. L. (2022). Difficultés liées aux tests spatiaux chez les étudiants : Une comparaison franco-sénégalaise. Dans H. Cheneval-Armand (dir.), *Actes du 6e colloque international du RAIFFET*.
<https://raiffet2020.sciencesconf.org/browse/author?authorid=965342>
- Charles, S., Jaillet, A., Peyret, N., et Jeannin, L. (2019). Éléments de mesure de la compétence de visualisation spatiale d'étudiants ingénieurs en mécanique. Dans P. Pilvin (dir.), *Actes du CFM 2019*. <https://cfm2019.sciencesconf.org/244039>
- Chester, I. (2007). Teaching for CAD expertise. *International Journal of Technology and Design Education*, 17(1), 23-35. <https://doi.org/10.1007/s10798-006-9015-z>
- Chu, M., et Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(4), 706-723. <https://doi.org/10.1037/a0013157>
- Cohen, C. A., et Hegarty, M. (2007). Sources of Difficulty in Imagining Cross Sections of 3D Objects. Dans *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.
- Computervision. (1983). *CADDS 4X*.
- Connor, J. M., et 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., et Conesa, J. (2005). Improving visualization skills in engineering education—IEEE Journals et Magazine. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(5), 24-31.
- Cooke-Simpson, A., et Voyer, D. (2007). Confidence and gender differences on the Mental Rotations Test. *Learning and Individual Differences*, 17(2), 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2007.03.009>
- Cooper, L. A. (1976). Individual differences in visual comparison processes. *Perception et Psychophysics*, 19, 433-444. <https://doi.org/10.3758/BF03199404>
- Cooper, L. A., et Mumaw, R. J. (1985). Spatial Aptitude. Dans R. F. Dillon (dir.) *Individual Differences in Cognition* (Vol. 2, p. 67-94). Academic Press.
- Cooper, L. A., et Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. Dans W. G. Chase (dir.), *Visual Information Processing* (p. 75-176). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-170150-5.50009-3>
- Cosnefroy, L. et Jézégou, A. (2013). Les processus d'autorégulation collective et individuelle au cours d'un apprentissage par projet. *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, 29(2).
- Cronbach, L. J. (1949). *Essentials of psychological testing* (p. xiii, 475). Harper.
- Dassault Systèmes. (2011). *CATIA* (Version 6) [logiciel]. https://discover.3ds.com/fr/catia-worlds-leading-solution-product-design-and-experience?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=202201_glo_sea_fr_op51508_labl_brand_ewe_exact&utm_term=catia-exact&utm_content=search&gclid=EAIaIQobChMIv8nDgf3T-gIVC7vVCh1ihgeAEAAAYASAAEgI9zfD_BwE
- Dassault Systèmes. (2012a). *3DEXPERIENCE*. <https://www.3ds.com/fr/3dexperience>
- Dassault Systèmes. (2012b). *CATIA* (V6 2013x) [logiciel]. https://discover.3ds.com/fr/catia-worlds-leading-solution-product-design-and-experience?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=202201_glo_sea_fr_op51508_labl_brand_ewe_exact&utm_term=catia-

- exact&utm_content=search&gclid=EAIaIQobChMIv8nDgf3T-gIVC7vVCh1ihgeAEAAAYASAAEgI9zfD_BwE
- de-Wit, L., Huygelier, H., Hallen, R. V. der, Chamberlain, R., et 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? Étude 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>
- Ekstrom, R. B., French, J. W., Harman, H. H., et Dermen, D. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests* (1976^e éd.). Educational Testing Service.
- 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., et Macfarlane Smith, I. (1983). *An international directory of spatial tests*. NFER-Nelson.
- Eme, P. E., et Marquer, J. (1998). Quantitative and qualitative individual differences in visual comparison processing: Are strategies only analytic or holistic? *Personality and Individual Differences*, 25(3), 459-475. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(98\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(98)00049-X)
- Emig, B., Menorca, M., Manohar, G., Kaur Walia, M., Malone, M. K., McDonald, S. et Alqarni, A. (2014). *V-note Pro* (version 2.7.2) [logiciel]. <https://v-note.org/>
- Feng, J., Spence, I., et Pratt, J. (2007). Playing an Action Video Game Reduces Gender Differences in Spatial Cognition. *Psychological Science*, 18(10), 850-855. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x>
- Flanagan, J. C., Dailey, J. T., Shaycoft, M. F., Gorham, W. A., Orr, D. B., Goldberg, I., et Neyman JR, C. A. (1961). *Project TALENT*. Project Talent Office.
- Fondation Jean Piaget. (2022a, février 10). Euclidien. *Présentation œuvre*. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/oeuvre/index_notions_nuage.php?NOTIONID=77
- Fondation Jean Piaget. (2022b, février 10). Projectif. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/presentation/index_notion.php?PRESMODE=1&NOTIONID=197
- Fondation Jean Piaget. (2022c, février 10). Topologique. 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*.
- French, J. W. (1965). The Relationship of Problem-Solving Styles to the Factor Composition of Tests. *Educational and Psychological Measurement*, 25(1), 9-28. <https://doi.org/10.1177/001316446502500102>
- French, J. W., Ekstrom, R. B., et Price, L. A. (1963). *Manual for kit of reference tests for cognitive factors*. Educational Testing Service. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/AD0410915>

- Gages, T. T. (1994). *The interrelationship among spatial ability, strategy used, and learning style for visualization problems* [thèse de doctorat, The Ohio State University, États Unis d'Amérique].
- Géronimi, A., De Vries, E., Prudhomme, G., et Baille, J. (2005). Objets intermédiaires dans une situation de conception en technologie avec CAO au collège. *Aster*, 41(Produire, agir, comprendre), 115-137. <https://doi.org/10.4267/2042/8869>
- Gibson, J. J. (2015). *The Ecological Approach to Visual Perception* (Classic Edition). Psychology Press.
- Giesecke, F. E., Mitchell, A., Spencer, H. C., Hill, I. L., et Dygdon, J. T. (1986). *Technical Drawing* (8e éd.). Mcmillan Publishing Company.
- Gillet, P. (1994). Conception assistée par ordinateur (CAO). *Techniques de l'ingénieur*, T73001-T730011.
- Gladieux, C. (2006). Du dessin à la modélisation déclarative. *cad-magazine*, 133, 60-62.
- Glen, S. (2022a). *Box's M Test: Definition*. StatisticsHowTo.com: Elementary Statistics for the rest of us! <https://www.statisticshowto.com/boxs-m-test/>
- Glen, S. (2022b). *Levene Test for Equality of Variances*. StatisticsHowTo.com: Elementary Statistics for the rest of us! <https://www.statisticshowto.com/levene-test/>
- Gold, A. U., Pendergast, P. M., Ormand, C. J., Budd, D. A., Stempien, J. A., Mueller, K. J., et 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 Volume*, 9, 201-208.
- Górska, R., Sorby, S. A., et Leopold, C. (1998). Gender Differences in Visualization Skills—An International Perspective. *The Engineering Design Graphics Journal*, 62(3), Article 3. <http://www.edgj.org/index.php/EDGJ/article/view/115>
- Gottschaldt, K. (1926). Über den Einfluß der Erfahrung auf die Wahrnehmung von Figuren. *Psychologische Forschung*, 8(1), 261-317. <https://doi.org/10.1007/BF02411523>
- 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. (1980). *Spatial Ability Measurement: A Critique and an Alternative*. Annual Meeting of the American Educational Research Association.
- Guay, R. B., et McDaniel, E. D. (1976). *The visualization of viewpoints*. Purdue Research Foudation.
- Guay, R. B., et McDaniel, E. D. (1978). *Correlates of performance on spatial aptitude tests* (rapport n° DAHC 19-77-G-0019). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Guay, R. B., McDaniel, E. D., et Angelo, S. (1978). Analytic factor confounding spatial ability measurement. Dans R. B. Guay et E. McDaniel (dir.), *Correlates of performance on spatial aptitude tests* (p. 116-128). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Guilford, J. P., et Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford-Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, 32(1), 24-34. <https://doi.org/10.1037/h0063610>
- Hamade, R. F., Artail, H. A., et Jaber, M. Y. (2005). Learning Theory as Applied to Mechanical CAD Training of Novices. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 19(3), 305-322. https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1903_2
- Hamlin, A., Boersma, N., et Sorby, S. (2006). Do Spatial Abilities Impact the Learning of 3-D Solid Modeling Software? Dans *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>
- Hartman, N. W. (2005). Defining Expertise in the Use of Constraint-based CAD Tools by Examining Practicing Professionals. *The Engineering Design Graphics Journal*, 69(1), 6-15.
- Hegarty, M. (2010). Components of Spatial Intelligence. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 52, p. 265-297). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)52007-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)52007-3)
- Hegarty, M. (2018). Ability and sex differences in spatial thinking: What does the mental rotation test really measure? *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(3), 1212-1219. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1347-z>
- Hegarty, M., Keehner, M., Khooshabeh, P., et Montello, D. R. (2009). How spatial abilities enhance, and are enhanced by, dental education. *Learning and Individual Differences*, 19(1), 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.04.006>
- Hegarty, M., Kozhevnikov, M., et Waller, D. (2008). *Perspective Taking/Spatial Orientation Test*. University of California.
- Hegarty, M., et Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2), 175-191.
- Hirschtick, J., McEleney, J., Li, T., Corcoran, D., Lauer, M., et Harris, S. (2014). *Onshape* (Version 103) [logiciel]. Onshape. <https://www.onshape.com/>
- Hopkins, K. D. (1998). *Educational and Psychological Measurement and Evaluation* (8e éd.). Allyn & Bacon.
- Hoyek, N., Collet, C., et 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>
- Hurlbut, J. (2011). The Necker Cube – An Alternative Measure of Direct Attention. Dans B. Sullivan (dir.), *Proceedings of the National Conference on Undergraduate Research*, 1222-1226.
- IBM France. (2017). *IBM SPSS Advanced Statistics 25*.
- IBM (2021). *IBM SPSS Statistics for Windows* (version 28.0) [logiciel]. <https://www.ibm.com/fr-fr/spss>
- IBM Support. (2020). *Repeated measures ANOVA: Interpreting a significant interaction in SPSS GLM*. IBM. <https://www.ibm.com/support/pages/repeated-measures-anova-interpreting-significant-interaction-spss-glm>
- Institut Polytechnique Grand Paris. (s.d.). *PLACIS*. <https://ipgrandparis.fr/fr/placis>
- ISAE-Supméca. (2016). *Expérimenter l'Apprentissage par problèmes et Projets via la conception 3D / EXAPP_3D*. https://www.isae-supmeca.fr/imgs_cont/images/files/2013_05__26_resume_EXAPP_3D.pdf
- ISAE-Supméca. (2017a, mai 4). *PRIM DIM -Catalogue des cours*. https://www.isae-supmeca.fr/catalogue/?acronyme=&status=Etudiant&semestre=S6&field_filtre=20f27a825e
- ISAE-Supméca. (2017b, octobre 19). *AMEC - Catalogue des cours*. https://www.isae-supmeca.fr/catalogue/?acronyme=&status=Etudiant&semestre=S5&field_filtre=20f27a825e
- ISAE-Supméca. (2018a, mars 23). *ALGO - Catalogue des cours*. https://www.isae-supmeca.fr/catalogue/?acronyme=&status=Etudiant&semestre=S5&field_filtre=20f27a825e

- ISAE-Supméca. (2018b, mai 4). *MAPP - Catalogue des cours*. https://www.isae-supmeca.fr/catalogue/?acronyme=&status=Etudiant&semestre=S5&field_filtre=20f27a825e
- Jaillet, A. (2009). Traces et histoires de traces. Dans F. Larose et A. Jaillet (dir.), *Le numérique dans l'enseignement et la formation : Analyses, traces et usages* (Collection Sciences et Société, p. 15-36). L'Harmattan.
- Jansen-Osmann, P., et Heil, M. (2007). Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *NeuroReport*, 18(2), 175-178. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328010ff6b>
- Just, M. A., et Carpenter, P. A. (1984). *Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability* (Technical report N° ONR84-1). Carnegie-Mellon University.
- Kanisza, G. (1955). Margini quasi-percettivi in campi con stimolazione omogenea. *Rivista di Psicologia*, 49(1), 7-30.
- Kellogg, M. (s.d.). Practical. Dans *Wordreference.com*. <https://www.wordreference.com/enfr/practical>
- Kelly Jr, W. F. (2013). *Measurement of Spatial Ability in an Introductory Graphic Communications Course*. North Carolina University.
- Kinney, P., et Gray, C. (2015). *SPSS facile appliqué à la psychologie et aux sciences sociales : Maîtriser le traitement des données*. De Boeck.
- Kirsh, D. (1995). Complementary Strategies: Why We Use Our Hands When We Think. Dans *Proceedings of the 17th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, T, 161-175.
- Kohs, S. C. (1923). *Intelligence measurement*. Macmillan Company.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain: The resolution of the Imagery Debate*. Massachusetts Institute of Technology.
- Kozhevnikov, M., et 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>
- Kruskal, W. H., et Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621. <https://doi.org/10.2307/2280779>
- Kucian, K., von Aster, M., Loenneker, T., Dietrich, T., Mast, F. W., et Martin, E. (2007). Brain activation during mental rotation in school children and adults. *Journal of Neural Transmission*, 114(5), 675-686. <https://doi.org/10.1007/s00702-006-0604-5>
- Kyllonen, P. C., Woltz, D. J., et Lohman, D. F. (1981). *Models of Strategy and Strategy-Shifting in Spatial Visualization Performance*. [rapport technique n° 17]. School of Education, Stanford University. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA108003>
- La Voix du Nord. (2012, octobre 17). *Énigme 34, Rubrique le Trucmuche*.
- Laisney, P., et Brandt-Pomares, P. (2015). Role of Graphics Tools in the Learning Design Process. *International Journal of Technology and Design Education*, 25(1), 109-119. <https://doi.org/10.1007/s10798-014-9267-y>
- Lang, G. T., Eberts, R. E., Gabel, M. G., et Barash, M. M. (1991). Extracting and using procedural knowledge in a CAD task. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 38(3), 257-268. <https://doi.org/10.1109/17.83758>
- Le Corff, Y., Yergeau, E., Beaudin, M.-E., et Dorceus, S. (2017). *Psychométrie*. Site Psychométrie à l'UdeS. <http://psychometrie.espaceweb.usherbrooke.ca/instrument-psychometrique>
- Lemaire, P. (2015). *Vieillesse cognitive et adaptations stratégiques* (1ère ed.). De Boeck Supérieur.

- Leopold, C. (2005). Geometry education for developing spatial visualisation abilities of engineering students. *Journal of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics*, 15, 39-45.
- Leopold, C., Górski, R., et Sorby, S. A. (2001). International experiences in developing visualization abilities of engineering students. *Journal for Geometry and Graphics*, 5(1), 81-91.
- Leplat, J. (2004). L'analyse psychologique du travail. *European Review of Applied Psychology*, 54(2), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2003.12.006>
- Levene, H. (1960). Robust Tests for Equality of Variances. Dans I. Olkin, S. G. Ghurye, W. Hoeffding, W. G. Madow, and H. B. Mann (dir.), *Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling* (Stanford University Press, p. 278-292).
- 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>
- Lieu, D. K., et Sorby, S. A. (2009). *Visualization, modeling, and graphics for engineering design* (1st éd.). Delmar, Cengage Learning.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22(140), 5-55.
- Likert, R., et Quasha, W. H. (1970). *Manual for Revised Minnesota Paper Form Board test*. The Psychological Corporation.
- 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., et 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>
- Liu, A. M., Oman, C. M., Galvan, R., et Natapoff, A. (2013). Predicting space telerobotic operator training performance from human spatial ability assessment. *Acta Astronautica*, 92(1), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.004>
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial Ability: A Review and Reanalysis of the Correlational Literature*. (Technical Report No. 8) (Technical report N° 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 R. J. Sternberg (dir.), *Advances in the psychology of human intelligence*, Vol. 4, (p. 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., et Kyllonen, P. C. (1983). Individual Differences in Solution Strategy on Spatial Tasks. Dans R. F. Dillon et R. R. Schmeck (dir.), dans *Individual Differences in Cognition* (Vol. 1, p. 105-135). Academic Press.
- Lohman, D. F., Pellegrino, J. W., Alderton, D. L., et Regian, J. W. (1987). Dimensions and Components of Individual Differences in Spatial Abilities. Dans S. H. Irvine et S. E. Newstead (dir.), *Intelligence and Cognition: Contemporary Frames of Reference* (p. 253-312). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9437-5_6
- Lucas, C. M. (1953). Analysis of the Relative Movement Test by a Method of Individual Interviews. *ETS Research Bulletin Series*, 1953(1), i-12. <https://doi.org/10.1002/j.2333-8504.1953.tb00037.x>

- Maculet, R., et Daniel, M. (2004). Conception, modélisation géométrique et contraintes en CAO : Une synthèse. *Revue d'intelligence artificielle*, 18(5-6), 619-645.
<https://doi.org/10.3166/ria.18.619-645>
- Maeda, Y., et 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>
- Maeda, Y., Yoon, S. Y., Kim-Kang, G., et 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.
- Mann, H. B., et Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Martín-Dorta, N., Saorín, J. L., et 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., et 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>
- Mauchly, J. W. (1940). Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), 204-209.
<https://doi.org/10.1214/aoms/1177731915>
- McDaniel, E. D., et 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>
- McNeill, D. (1992). *Hand and Mind: What Gestures Reveal about Thought*. The University of Chicago Press.
- McNemar, Q. (1947). Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. *Psychometrika*, 12, 153-157.
<https://doi.org/10.1007/BF02295996>
- Metz, S. (2008). Les situations d'apprentissage collectives instrumentées dans le supérieur : identification et exploration [manuscrit auteur]. *Les enjeux de la formation et de la communication*. n°09/2.
- Michael, W. B., Guilford, J. P., Fruchter, B., et Zimmerman, W. S. (1957). The Description of Spatial-Visualization Abilities. *Educational and Psychological Measurement*, 17(2), 185-199. <https://doi.org/10.1177/001316445701700202>
- Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique et Commissariat général à l'investissement. (2016). *Investissements d'avenir : 22 projets lauréats de l'action "e-FRAN" pour le développement de territoires éducatifs d'innovation numérique* [communiqué de presse].
https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2016/09/23092016_dp_presentation_des_laureats_e-fran.pdf
- Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. (2011). *PLACIS*.
https://media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/IDEFI_2/21/1/PLACIS_210211.pdf

- Minitab. (2022). *Observations relatives aux données pour la fonction Test de Kruskal-Wallis*. Minitab.com. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/kruskal-wallis-test/before-you-start/data-considerations/>
- Moè, A. (2009). Are males always better than females in mental rotation? Exploring a gender belief explanation. *Learning and Individual Differences*, 19(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.02.002>
- Mohler, J. L., et Miller, C. L. (2008). Improving Spatial Ability with Mentored Sketching. *Engineering Design Graphics Journal*, 72(9), 19-27.
- Moreau, D., Clerc, J., Mansy-Dannay, A., et 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>
- Nagy-Kondor, R. (2017). Spatial Ability: Measurement and Development. In M. S. Khine (dir.), *Visual-spatial Ability in STEM Education: Transforming Research into Practice* (p. 35-58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44385-0_3
- Necker, L. A. (1832). LXI. Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1(5), 329-337.
- Newcombe, N. (2017). *Harnessing Spatial Thinking to Support Stem Learning (OCED Education Working Paper No. 161)*. OECD. <https://doi.org/10.1787/7d5dcae6-en>
- Octobre, S. (2008). Loisirs culturels et construction du genre au sein de la famille. *Agora débats/jeunesses*, 47(1), 98-110. <https://doi.org/10.3917/agora.047.0098>
- Office québécois de la langue française. (2012). Axonométrie. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8999564
- Office Québécois de la langue française. (1989). Latence. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17033562
- Office québécois de la langue française. (2012a). Cote. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8460702
- Office québécois de la langue française. (2012b). Isométrie. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8499367
- Olry, P. (2019). Aleksei Leontiev et la théorie de l'activité. Dans P. Carré et P. Mayen (dir.), *Psychologies pour la formation* (p. 105-121). Dunod; Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/dunod.carre.2019.02.0105>
- Olson, A. M., et Sabers, D. (2008). Standardized tests. In *21st century education: A reference handbook* (Thomas L. Good, Vol. 1, p. 423-430). SAGE Publications.
- Onshape. (2022). *Glossary*. <https://cad.onshape.com/help/Content/Glossary/glossary.htm>
- Onyancha, R. M., Derov, M., et 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>
- Pearson, K. (1895). Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. Dans *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240-242.
- Pellegrino, J. W., Mumaw, R. J., et Shute, V. J. (1985). Analyses of spatial aptitude and expertise. Dans S. E. Embretson (dir.), *Test design: Developments in psychology and psychometrics* (p. 45-76). Academic Press.
- Penrose, L. S., et Penrose, R. (1958). Impossible Objects: A Special case of Visual Illusion. *British Journal of Psychology*, 49(1), 31-33. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1958.tb00634.x>

- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., et 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>
- Peyret, N., Courtois, S., et Chevallier, G. (2019). Combined project-based learning and teacher-practical demonstrations to help acquire global engineering skills. Dans *47th SEFI Annual Conference Proceedings*, 871-878.
- Piaget, J., et 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.
- Pro/ENGINEER. (1988). *Pro/ENGINEER*.
- Reilly, D., Neumann, D. L., et 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 (dir.), *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
- Rock, I., Wheeler, D., et Tudor, L. (1989). Can we imagine how objects look from other viewpoints? *Cognitive Psychology*, 21(2), 185-210. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(89\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(89)90007-8)
- Rogalski, J. (2013). Théorie de l'activité et cadres développementaux pour l'analyse liée des pratiques des enseignants et des apprentissages des élèves. Dans F. Vanderbrouck (dir.) *Activités des élèves et pratiques des enseignants en classe de mathématiques* [ouvrage en cours d'édition]. Sense Publishers.
- Rynne, A., et Gaughran, W. F. (2007). Cognitive modeling strategies for optimum design intent in parametric modeling (PM). *Computers in Education Journal*, 18(3), 55-68.
- Saint-Martin, F. (1992). *La théorie de la Gestalt et l'art visuel : Essai sur les fondements de la sémiotique visuelle*. Presses de l'Université du Québec.
- Salmani Nodoushan, A. M. (2021). Test Affordances or Test Function? Did We Get Messick's Message Right? *International Journal of Language Studies*, 15(3), 127-140.
- Savoyant, A. (2010). Éléments d'un cadre d'analyse de l'activité : Quelques conceptions essentielles de la psychologie soviétique (1979). *Travail et Apprentissages*, 5(1), 91-107. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/ta.005.0091>
- Schell, B., et Esch, J. (2000). *SketchUp*. Trimble Inc. <https://www.sketchup.com>
- Schwartz, P. A. (1963). Adapting tests to the cultural setting. *Educational and Psychological Measurement*, 23(4), 673-686.
- Schwarz, N., et Hippler, H.-J. (1991). Response alternatives: The impact of their choice and presentation order. Dans *Measurement error in surveys* (p. 41-56). Wiley.
- Shah, J. J. (2001). Designing with Parametric CAD: Classification and comparison of construction techniques. Dans F. Kimura (dir.), *Geometric Modelling: Theoretical and Computational Basis towards Advanced CAD Applications. IFIP TC5/WG5.2 Sixth International Workshop on Geometric Modelling December 7-9, 1998, Tokyo, Japan* (p. 53-68). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35490-3_4
- Shapiro, S. S., et Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Shea, D. L., Lubinski, D., et 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., et Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972), 701-703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Snow, R. E. (1980). *Aptitudes and Instructional Methods: Research on Individual Differences in Learning-Related Processes* [rapport]. Stanford University, School of Education. <https://eric.ed.gov/?id=ED204407>
- Snow, R. E. (1993). Construct validity and constructed-response tests. Dans R. E. Bennett et W. C. Ward (dir.), *Construction Versus Choice in Cognitive Measurement: Issues in Constructed Response, Performance Testing, and Portfolio Assessment* (p. 45-60). Routledge.
- SolidWorks. (1995). *SolidWorks* [logiciel]. <https://www.solidworks.com/fr>
- Somers, M., Shields, L. S., Boks, M. P., Kahn, R. S., et 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>
- Sonntag, M. (2007). La conception au cœur de la formation professionnelle. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 40(3), 59-78. <https://doi.org/10.3917/lsdle.403.0059>
- 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. Dans *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), Article 3. <http://www.edgj.org/index.php/EDGJ/article/view/41>
- Sorby, S. A., et Baartmans, B. J. (2000). The Development and Assessment of a Course for Enhancing the 3-D Spatial Visualization Skills of First Year Engineering Students. *Journal of Engineering Education*, 89(3), 301-307. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2000.tb00529.x>
- Sorby, S. A., Casey, B., Veurink, N., et 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.
- Sternberg, R. J. (1977). *Intelligence, information processing, and analogical reasoning: The componential analysis of human abilities* (p. xi, 348). Lawrence Erlbaum.
- Student. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6(1), 1-25. <https://doi.org/10.2307/2331554>
- 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. (1990a). Spatial orientation skill and mathematical problem solving. *Journal for Research in Mathematics Education*, 216-229.
- Tartre, L. A. (1990b). Spatial skills, gender, and mathematics. Dans E. Fennema et G. C. Leder (dir.), *Mathematics and gender* (p. 27-59). Teachers College Press.

- Techsmith (2019). Camtasia (version 2019.0.1) [logiciel].
<https://www.techsmith.fr/camtasia.html>
- Thurstone, L. L. (1938a). *Primary mental abilities*. University of Chicago Press.
- Thurstone, L. L. (1938b). The perceptual factor. *Psychometrika*, 3(1), 1-17.
<https://doi.org/10.1007/BF02287914>
- Thurstone, L. L. (1950). Some Primary Abilities in Visual Thinking. Dans *Proceedings of the American Philosophical Society*, 94(6), 517-521.
- Thurstone, L. L., et Jeffrey, T. E. (1956). *Closure Flexibility (Concealed Figures) Test—Form A*. Industrial Relations Center - The University of Chicago.
- Thurstone, L. L., et Jeffrey, T. E. (1965). *Closure Flexibility (Concealed figures) Test administration Manual*. Industrial Relations Center - The University of Chicago.
- Thurstone, L. L., et Thurstone, T. G. (1941). Factorial studies of intelligence. *Psychometric Monographs*, 2, 94-94.
- Tsutsumi, E., Ishikawa, W., Sakuta, H., et Suzuki, K. (2008). Analysis of Causes of Errors in the Mental Cutting Test—Effects of View Rotation. *Journal for Geometry and Graphics*, 12(1), 109-120.
- Tsutsumi, E., Schröcker, H. P., Stachel, H., et Weiss, G. (2005). Evaluation of Students' Spatial Abilities in Austria and Germany. *Journal for Geometry and Graphics*, 9(1), 107-117.
- Tsutsumi, E., Shiina, K., Suzaki, A., Yamanouchi, K., Saito, T., et 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., et 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>
- van den Berg, R. G. (2022a). *SPSS ANOVA – Levene's Test "Significant"*. SPSS Tutorials.
<https://www.spss-tutorials.com/spss-anova-levenes-test-significant/>
- van den Berg, R. G. (2022b). *SPSS Repeated Measures ANOVA II*. SPSS Tutorials.
<https://www.spss-tutorials.com/spss-repeated-measures-anova-example-2/>
- Vandenberg, S. G., et 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>
- van Rossum, G. (1991). *Python* [langage de programmation]. <https://www.python.org>
- Vaudor, L. (2015, janvier 30). Non-respect des hypothèses du modèle linéaire (ANOVA, régression) : C'est grave, docteur ? *R-atique*. <http://perso.ens-lyon.fr/lise.vaudor/non-respect-des-hypotheses-du-modele-lineaire-anova-regression-cest-grave-docteur/>
- 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., et 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.
- Wagner-Egger, P., et Nidegger, S. (2015). *Guide SPSS pour les nuls, mais pas trop quand même*. Université de Fribourg.
- Wai, J., Lubinski, D., et Benbow, C. P. (2009). Spatial Ability for STEM Domains: Aligning over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 817-835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. *Psychologische Forschung*, 4(1), 301-350. <https://doi.org/10.1007/BF00410640>
- Wiebe, E. N. (1999). 3-D Constraint-based Modeling: Finding Common Themes. *Engineering Design Graphics Journal*, 63(3), 15-31.

- Witkin, H. A., Dyk, R. B., Faterson, H. F., Goodenough, D. R., et Karp, S. A. (1962). *Psychological differentiation; studies of development*. New York, Wiley.
<http://archive.org/details/psychologicaldif00witk>
- Workman, J. E., Caldwell, L. F., et Kallal, M. J. (1999). Development of a Test to Measure Spatial Abilities Associated with Apparel Design and Product Development. *Clothing and Textiles Research Journal*, 17(3), 128-133.
<https://doi.org/10.1177/0887302X9901700303>
- Workman, J. E., et Lee, S.-H. (2004). A Cross-cultural Comparison of The Apparel Spatial Visualization Test and Paper Folding Test. *Clothing and Textiles Research Journal*, 22(1-2), 22-30. <https://doi.org/10.1177/0887302X0402200104>
- Ye, X., Peng, W., Chen, Z., et Cai, Y.-Y. (2004). Today's students, tomorrow's engineers: An industrial perspective on CAD education. *Computer-Aided Design*, 36(14), 1541-1460.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2003.11.006>
- 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>
- Yoon, S. Y., et Mann, E. L. (2017). Exploring the Spatial Ability of Undergraduate Students: Association With Gender, STEM Majors, and Gifted Program Membership. *Gifted Child Quarterly*, 61(4), 313-327. <https://doi.org/10.1177/0016986217722614>
- Yoon, S. Y., et Min, K.-H. (2016). College students' performance in an introductory atmospheric science course: Associations with spatial ability. *Meteorological Applications*, 23. <https://doi.org/10.1002/met.1565>
- Yue, J. (2006). Spatial Visualization by Isometric Drawing. Dans *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference*, 3, 24
- Yue, J. (2008). Spatial Visualization by Realistic 3D Views. *Engineering Design Graphics Journal*, 72(1), 28-38.
- Zimmerman, W.S. (1954). Hypotheses concerning the nature of spatial factors. *Educational and Psychological Measurement*, 14, 396-400.

Liste des figures

FIGURE 1.	CLASSIFICATION DES COMPETENCES SPATIALES SELON TARTRE (1984)	34
FIGURE 2.	REPRESENTATION D'UNE TACHE DE ROTATION MENTALE.....	35
FIGURE 3.	REPRESENTATION D'UNE TACHE DE TRANSFORMATION MENTALE.....	36
FIGURE 4.	LE CUBE DE NECKER	37
FIGURE 5.	LE TRIANGLE DE KANISZA	37
FIGURE 6.	TACHE DANS LAQUELLE IL FAUT DISSOCIER UN ELEMENT INTRIQUE DANS UN MOTIF COMPLEXE	38
FIGURE 7.	PHASES DE L'HISTOIRE DE LA RECHERCHE SUR L'HABILETE SPATIALE	38
FIGURE 8.	CLASSIFICATION DES FACTEURS SPATIAUX ADAPTEE DU MODELE DE TARTRE (1984)	39
FIGURE 9.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU MRT (VANDENBERG ET KUSE, 1978), VERSION D'ALBARET ET AUBERT (1996).....	41
FIGURE 10.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU PSVT:R	42
FIGURE 11.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU MCT	43
FIGURE 12.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU PSVT:V	44
FIGURE 13.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU <i>VISUALIZATION OF VIEWPOINTS</i>	44
FIGURE 14.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU PTSOT	45
FIGURE 15.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU HFT	46
FIGURE 16.	EXEMPLE DE QUESTION ISSUE DU CFT (THURSTONE ET JEFFREY, 1956)	46
FIGURE 17.	EXEMPLES DE TESTS PAPIER-CRAYON VISANT A MESURER LES FACTEURS DU MODELE DE TARTRE (1984).....	47
FIGURE 18.	LE TRIANGLE DE PENROSE	49
FIGURE 19.	LE CUBE DE NECKER ET LES DEUX ORIENTATIONS QUI PEUVENT EN ETRE INTERPRETEES	50
FIGURE 20.	EXEMPLE DE GEOMETRIE DE CONSTRUCTION DE SOLIDES	50
FIGURE 21.	ÉVOLUTION DE LA CAO	54
FIGURE 22.	CONNAISSANCES NECESSAIRES A L'UTILISATION EFFICACE DE MODELEURS 3D.....	55
FIGURE 23.	PRESENCE DE GESTES SPONTANES	57
FIGURE 24.	ABSENCE DE GESTES SPONTANES	57
FIGURE 25.	PERFORMANCE ET STRATEGIES DE RESOLUTION : SOURCES DE VARIANCE DANS LES TESTS SPATIAUX	73
FIGURE 26.	APPROCHES D'INVESTIGATION DES STRATEGIES DE RESOLUTION	74
FIGURE 27.	STRATEGIES HOLISTIQUES VERSUS STRATEGIES ANALYTIQUES.....	76
FIGURE 28.	VUES DONNEES DE L'OBJET A MODELISER DANS L'EXPERIENCE DE LANG <i>ET AL.</i> (1991)	80
FIGURE 29.	EXEMPLE DE SEQUENCE ORIENTEE OBJET	81
FIGURE 30.	EXEMPLE DE SEQUENCE ORIENTEE OBJET	81
FIGURE 31.	VUES ORTHOGRAPHIQUES UTILISEES POUR LA TACHE DE MODELISATION DE L'EXPERIENCE DE HARTMAN (2005)	82
FIGURE 32.	VUES PROJETEEES UTILISEES POUR LA TACHE DE MODELISATION DE RYNNE ET GAUGHRAN (2007)	83
FIGURE 33.	APPROCHES D'INVESTIGATION DES STRATEGIES DE RESOLUTION	84
FIGURE 34.	APPROCHES ORIENTEES OBJET ET CARACTERISTIQUE	86
FIGURE 35.	L'ACTIVITE SELON SAVOYANT (2010)	91
FIGURE 36.	METHODOLOGIE D'EXTRACTION DES DONNEES DE JAILLET (2009)	92
FIGURE 37.	CONCEPTION DU PROTOCOLE DE MESURE DE L'HABILETE SPATIALE ET DES STRATEGIES QUI Y SONT MOBILISEES.....	98
FIGURE 38.	REPÈRE ADOPTÉ POUR DÉCRIRE LES ROTATIONS DU R PSVT:R	103
FIGURE 39.	CONCEPTION DU PROTOCOLE DE MESURE DE LA MODELISATION 3D ET DES STRATEGIES QUI Y SONT MOBILISEES.....	106
FIGURE 40.	OBJET MODELISE A L'ISSUE DE L'EXERCICE DE PRISE EN MAINS.....	108
FIGURE 41.	VUES DONNEES DE L'OBJET A MODELISER	109
FIGURE 42.	CALENDRIER DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	120
FIGURE 43.	DISPOSITIF DE CAPTATION DE LA SEANCE DE MODELISATION	125
FIGURE 44.	DISPOSITIF DE CAPTATION DE LA SEANCE DE CONCEPTION COLLECTIVE.....	127
FIGURE 45.	EXEMPLE D'ENCODAGE D'UNE REPONSE AU QUESTIONNAIRE OUVERT STRATEGIES PSVT:V ...	130
FIGURE 46.	EXEMPLE DE VERBATIM ISSU DU QUESTIONNAIRE OUVERT STRATEGIES R PSVT:R.....	131

FIGURE 47.	INSTRUCTIONS DU MCT TRADUITES EN FRANÇAIS	132
FIGURE 48.	CRITERES D'EVALUATION DE LA MODELISATION.....	149
FIGURE 49.	EXEMPLE DE ROGNAGE DE LA CLAVETTE NON EFFECTUE	151
FIGURE 50.	EXEMPLE DE LONGUEUR TOTALE DEFINIE A PARTIR DES EXTREMITES DE LA PIECE	153
FIGURE 51.	EXEMPLE DE LONGUEUR TOTALE DEFINIE PAR DECOMPOSITION.....	153
FIGURE 52.	SEQUENCE D'EXTRUSIONS MISES EN ŒUVRE POUR PERCER LA CLAVETTE	155
FIGURE 53.	CLAVIER DEDIE A L'ENCODAGE	162
FIGURE 54.	ÉCRAN D'ENCODAGE DANS V-NOTE PRO.....	162
FIGURE 55.	DISTRIBUTION DES SCORES DU PSVT:V1.....	181
FIGURE 56.	DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1	182
FIGURE 57.	DISTRIBUTION DU PSVT:V1 SELON LE GENRE	183
FIGURE 58.	DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LE GENRE.....	184
FIGURE 59.	DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES.....	186
FIGURE 60.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE TOEIC ET DES SCORES DE R PSVT:R1.....	200
FIGURE 61.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE TOEIC ET DES SCORES DE CFT1	200
FIGURE 62.	DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION AU RECUEIL 1 (N = 129).....	221
FIGURE 63.	DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LA FORMATION	223
FIGURE 64.	DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LES LOISIRS DE CONSTRUCTION PRATIQUES A L'AGE ADULTE	227
FIGURE 65.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE TOEIC ET DES SCORES DE MODELISATION.....	229
FIGURE 66.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE PSVT:V1 ET DES SCORES DE MODELISATION.....	232
FIGURE 67.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE R PSVT:R1 ET DES SCORES DE MODELISATION.....	233
FIGURE 68.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE MRT1 ET DES SCORES DE MODELISATION.....	233
FIGURE 69.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE MCT1 ET DES SCORES DE MODELISATION.....	234
FIGURE 70.	NUAGE DE POINTS DES SCORES DE CFT1 ET DES SCORES DE MODELISATION	234
FIGURE 71.	DISTRIBUTION DES SCORES DU PSVT:V1 SELON CATEGORIE NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES - PERÇAGE.....	241
FIGURE 72.	DIAGRAMME DE DISPERSION DES SCORES DU CFT1 PAR RAPPORT A CEUX DU CFT2	255
FIGURE 73.	ÉVOLUTION DES SCORES DU CFT	255
FIGURE 74.	BOITES A MOUSTACHES DES SCORES DES TESTS SPATIAUX CONVERTIS EN POURCENTAGES AU PREMIER ET AU DEUXIEME RECUEIL	257
FIGURE 75.	METHODOLOGIE DE TRAITEMENT DES ANOVA MIXTES METTANT EN REGARD LES EVOLUTIONS DE PERFORMANCE ET LES FACTEURS	260
FIGURE 76.	DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V POUR LES FEMMES ET LES HOMMES	262
FIGURE 77.	DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION AU PREMIER ET SECOND RECUEILS (N = 98) ...	295
FIGURE 78.	PROGRESSION EN MODELISATION MISE EN REGARD AVEC LA PROGRESSION AU CFT	306
FIGURE 79.	COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION AU RECUEIL 1 ET 2 (N = 28)	314

Liste des tableaux

TABEAU 1.	SYNTHESE DES FACTEURS SPATIAUX ET AUTEURS.....	33
TABEAU 2.	PARTICIPATION DES VOLONTAIRES DANS L'EXPERIMENTATION A.....	58
TABEAU 3.	FREQUENCE DES STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS L'EXPERIMENTATION A.....	59
TABEAU 4.	RECAPITULATIF DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LES TESTS SPATIAUX.....	65
TABEAU 5.	RECAPITULATIF DES COMPOSANTS IDENTIFIES DANS LES STRATEGIES.....	69
TABEAU 6.	ANALYSE FFOM DES PROTOCOLES D'INVESTIGATION DES STRATEGIES.....	75
TABEAU 7.	ANALYSE FFOM DES PROTOCOLES D'INVESTIGATION DES STRATEGIES.....	85
TABEAU 8.	STRATEGIES MOBILISEES DANS LES TESTS EXPERIMENTES ET LEUR DISTRIBUTION EXPRIMEE EN POURCENTAGES	100
TABEAU 9.	DESCRIPTION DES QUESTIONS PRESENTEES DANS LE QUESTIONNAIRE OUVERT STRATEGIES ..	104
TABEAU 10.	VOLUMES HORAIRES DES ENSEIGNEMENTS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES DANS LES FILIERES MP, PC, PSI, PT ET TSI	105
TABEAU 11.	PARTICIPATION DES VOLONTAIRES DANS LES EXPERIMENTATIONS.....	110
TABEAU 12.	DESCRIPTION DES EQUIPES	112
TABEAU 13.	TABLE DE FREQUENCE DES LOISIRS PRATIQUES.....	116
TABEAU 14.	DESCRIPTION DES TESTS ET DES COMPETENCES SPATIALES VISEES	122
TABEAU 15.	PARTICIPATION DES ETUDIANTS	126
TABEAU 16.	PARTICIPATION DES ETUDIANTS AU RECUEIL 2	126
TABEAU 17.	CATEGORISATION DES STRATEGIES DE RESOLUTION ADOPTEES DANS LES TESTS SPATIAUX.....	129
TABEAU 18.	TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE PSVT:V1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES	133
TABEAU 19.	GRILLE D'ENCODAGE DU QCM STRATEGIES PSVT:V.....	135
TABEAU 20.	DISTRIBUTION DES COMBINAISONS DE STRATEGIES ISSUES DES QCM DANS LES TESTS SPATIAUX.....	136
TABEAU 21.	CATEGORISATION DES LOISIRS SELON LES DIMENSIONS DYNAMIQUE, MANIPULATOIRE, DE CONSTRUCTION 3D, 2D, ET ARTISTIQUE	140
TABEAU 22.	AFFECTATION D'UN INDICE AUX CATEGORIES DE LA DIMENSION DYNAMIQUE	141
TABEAU 23.	COMBINAISON DES INDICES DE LA DIMENSION DYNAMIQUE	141
TABEAU 24.	DEFINITIONS DES INDICES DIMENSIONNELS DE LA DIMENSION DYNAMIQUE	142
TABEAU 25.	DISTRIBUTION DES SUJETS EN FONCTION DE LA PREVALENCE MANUELLE	143
TABEAU 26.	DISTRIBUTION DES PRATIQUES DE LOGICIELS DE MODELISATION	143
TABEAU 27.	DISTRIBUTION DU NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES.....	144
TABEAU 28.	DISTRIBUTION DES GENRES.....	144
TABEAU 29.	DISTRIBUTION DES FILIERES D'ORIGINE	145
TABEAU 30.	DISTRIBUTION DES FILIERES D'ORIGINE SELON LA TENEUR EN ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES	145
TABEAU 31.	DISTRIBUTION DU NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES APPRISES	146
TABEAU 32.	DEFINITION DES GROUPES DE PERFORMANCE AU TOEIC.....	146
TABEAU 33.	DEFINITION DES GROUPES DE PERFORMANCE AUX ENSEIGNEMENTS DU PREMIER SEMESTRE	147
TABEAU 34.	BAREME D'EVALUATION DE LA MODELISATION	150
TABEAU 35.	TYPOLOGIE DE LA CATEGORIE L TOTALE - SYMETRIE	154
TABEAU 36.	TYPOLOGIE DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES - PERÇAGE	156
TABEAU 37.	TYPOLOGIE DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES - PERÇAGE	157
TABEAU 38.	TYPOLOGIE DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – EXTRUSIONS - PERÇAGE.....	157
TABEAU 39.	LISTE DES CONTRAINTES, ENTITES GEOMETRIQUES, FONCTIONS ET OUTILS DE VISIONNAGE RECURRENTS.....	161
TABEAU 40.	TAUX DE RECOUVREMENT DE L'ENCODAGE 2	163
TABEAU 41.	DISTRIBUTION DES ACTIONS BRUTES ET INDICEES DE L'ENCODAGE 4	164
TABEAU 42.	CATEGORISATION DU NOMBRE D'ACTIONS.....	164
TABEAU 43.	TABLE DE FREQUENCE DES INDICES NOMBRE D'ACTIONS.....	164
TABEAU 44.	CATEGORISATION DES DIMENSIONS AVORTEMENTS, ERREURS ET FACTORISATION.....	165
TABEAU 45.	TABLE DE FREQUENCE DES DIMENSIONS AVORTEMENTS, ERREURS ET FACTORISATION – RECUEIL 1.....	165

TABEAU 46.	CATEGORISATION DE L'INDICE TEMPS DE REALISATION.....	166
TABEAU 47.	TABLE DE FREQUENCE DE L'INDICE TEMPS DE REALISATION.....	166
TABEAU 48.	RELEVÉ D'ACTIVITÉ DE LA SEANCE DE MODELISATION EN GROUPE.....	167
TABEAU 49.	RECAPITULATIF DES DONNEES RECUEILLIES ET VARIABLES IDENTIFIEES.....	172
TABEAU 50.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU PSVT:V1.....	181
TABEAU 51.	RESULTATS DU TEST DE NORMALITE DU PSVT:V1.....	181
TABEAU 52.	RECAPITULATIF DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET TESTS DE NORMALITE DES TESTS SPATIAUX.....	182
TABEAU 53.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY – PSVT:V1 ET GENRE.....	183
TABEAU 54.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE GENRE.....	183
TABEAU 55.	TEST <i>T</i> DES ECHANTILLONS INDEPENDANTS – CFT1 ET GENRE.....	184
TABEAU 56.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES.....	186
TABEAU 57.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION.....	187
TABEAU 58.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES.....	188
TABEAU 59.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES DEP – ENFANCE ET ADOLESCENCE (<i>N</i> = 146).....	189
TABEAU 60.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LES CATEGORIES DEPP METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS DE DEPLACEMENT.....	189
TABEAU 61.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES M – ENFANCE ET ADOLESCENCE (<i>N</i> = 146).....	190
TABEAU 62.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS MANIPULATOIRES.....	190
TABEAU 63.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES 2D – ENFANCE ET ADOLESCENCE (<i>N</i> = 146).....	191
TABEAU 64.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS 2D.....	191
TABEAU 65.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES C3D – ENFANCE ET ADOLESCENCE (<i>N</i> = 146).....	192
TABEAU 66.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS DE CONSTRUCTION.....	192
TABEAU 67.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES ART – ENFANCE ET ADOLESCENCE (<i>N</i> = 146).....	193
TABEAU 68.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS ARTISTIQUES.....	193
TABEAU 69.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES DEP – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 146).....	194
TABEAU 70.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS DYNAMIQUES.....	195
TABEAU 71.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES M – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 146).....	195
TABEAU 72.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS MANIPULATOIRES.....	196
TABEAU 73.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES 2D – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 146).....	196
TABEAU 74.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS 2D.....	197
TABEAU 75.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES C3D – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 146).....	197
TABEAU 76.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS DE CONSTRUCTION.....	198
TABEAU 77.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES ART – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 146).....	198
TABEAU 78.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES LOISIRS ARTISTIQUES.....	199
TABEAU 79.	CORRELATION DE SPEARMAN POUR LES SCORES TOEIC ET LES SCORES DU PSVT:V1, DU R PSVT:R1, DU MRT1 ET DU MCT1.....	199
TABEAU 80.	LISTE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE PSVT:V1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES ET LEUR FREQUENCE.....	202
TABEAU 81.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE STRATEGIES UNIQUES DECLAREES MOBILISEES DANS LE PSVT:V1 DANS LES VERBATIM STRATEGIES.....	203
TABEAU 82.	DESCRIPTIVES STATISTIQUES DU NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES VERBATIM STRATEGIES.....	203

TABEAU 83.	TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES UNIQUES RELEVÉES DANS LES QCM STRATEGIES ..	204
TABEAU 84.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE STRATEGIES UNIQUES DECLARÉES MOBILISÉES DANS LE PSVT:V1 DANS LE QCM STRATEGIES	204
TABEAU 85.	DESCRIPTIVES STATISTIQUES DU NOMBRE DE STRATEGIES UNIQUES OU FAISANT PARTIE D'UNE SEQUENCE DECLARÉES MOBILISÉES DANS LES TESTS DANS LES QCM STRATEGIES	205
TABEAU 86.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LE NOMBRE DE STRATEGIES DECLARÉES DANS LES VERBATIM	206
TABEAU 87.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LE NOMBRE DE STRATEGIES DECLARÉES MOBILISÉES DANS LES QCM STRATEGIES	207
TABEAU 88.	RESULTATS DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LA MOBILISATION D'UNE OU PLUSIEURS STRATEGIES D'APRES LES QCM STRATEGIES	208
TABEAU 89.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LES COMBINAISONS DE STRATEGIES DECLARÉES DANS LES QCM	209
TABEAU 90.	TABLE DE FREQUENCE DU CHANGEMENT DE STRATEGIE POUR LE PSVT:V1 D'APRES LES VERBATIM STRATEGIES.....	210
TABEAU 91.	RESULTATS DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 METTANT EN REGARD LA PERFORMANCE SPATIALE ET LE CHANGEMENT DE STRATEGIE D'APRES LES VERBATIM	210
TABEAU 92.	RECAPITULATIF DES RESULTATS SIGNIFICATIFS ET FAIBLEMENT SIGNIFICATIFS DES HYPOTHESES HS.....	216
TABEAU 93.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES SCORES DE MODELISATION.....	220
TABEAU 94.	RESULTATS DU TEST DE NORMALITE DES SCORES DE MODELISATION AU PREMIER RECUEIL	221
TABEAU 95.	RESULTATS DU TEST DE NORMALITE DES SCORES SPATIAUX (<i>N</i> = 129).....	222
TABEAU 96.	COMPARAISONS APPARÉES DE C3D – ÂGE ADULTE (<i>N</i> = 129)	228
TABEAU 97.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES SCORES DE TOEIC (<i>N</i> = 129).....	229
TABEAU 98.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU NOMBRE DE VOLUMES FONCTIONNELS.....	230
TABEAU 99.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE VOLUMES FONCTIONNELS.....	230
TABEAU 100.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE DE VOLUMES FONCTIONNELS	231
TABEAU 101.	CORRELATION DE SPEARMAN POUR LES SCORES DE MODELISATION ET LES SCORES DU PSVT:V1, DU R PSVT:R1, DU MRT1, DU MCT1 ET DU CFT1	232
TABEAU 102.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU NOMBRE DE CERCLES	235
TABEAU 103.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE CERCLES	235
TABEAU 104.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE DE CERCLES.....	236
TABEAU 105.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU NOMBRE D'ESQUISSES	236
TABEAU 106.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE D'ESQUISSES.....	237
TABEAU 107.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE D'ESQUISSES.....	237
TABEAU 108.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU NOMBRE D'EXTRUSIONS	238
TABEAU 109.	TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE D'EXTRUSIONS.....	238
TABEAU 110.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LE NOMBRE D'EXTRUSIONS.....	238
TABEAU 111.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA STRATEGIE DE PERÇAGE DE LA CLAVETTE.....	239
TABEAU 112.	DEFINITION ET DISTRIBUTION DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES - PERÇAGE.....	239
TABEAU 113.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA CATEGORIE NOMBRE DE VOLUMES - PERÇAGE.....	240
TABEAU 114.	DEFINITION ET DISTRIBUTION DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES – PERÇAGE.....	240
TABEAU 115.	COMPARAISONS APPARÉES DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES - PERÇAGE	242

TABLEAU 116.	DEFINITION ET DISTRIBUTION DES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – EXTRUSIONS – PERÇAGE.....	243
TABLEAU 117.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA STRATEGIE DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE	244
TABLEAU 118.	RECAPITULATIF DU TEST <i>U</i> DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA SYMETRIE DE LA PIECE	245
TABLEAU 119.	TYPOLOGIE ET DISTRIBUTION DE LA CATEGORIE L TOTALE - SYMETRIE	245
TABLEAU 120.	RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA CATEGORIE L TOTALE - SYMETRIE	246
TABLEAU 121.	RECAPITULATIF DES RESULTATS SIGNIFICATIFS ET FAIBLEMENT SIGNIFICATIFS DES HYPOTHESES MV LIEES AUX SCORES SPATIAUX	251
TABLEAU 122.	RESULTATS DU TEST DU SIGNE POUR LE PSVT:V, LE R PSVT:R, LE MRT ET LE MCT	256
TABLEAU 123.	ÉTUDE DE L'EFFET D'ENTRAÎNEMENT POUR CHACUN DES TESTS	257
TABLEAU 124.	ANALYSES DE REGRESSION LINEAIRE POUR LES TESTS SPATIAUX AUX DEUX RECUEILS.....	258
TABLEAU 125.	CATEGORIES DE VARIABLES REGROUPEES POUR LES ANOVA RELATIVES A L'ÉVOLUTION DE L'HABILETE SPATIALE	259
TABLEAU 126.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LE GENRE ET LA PREVALENCE MANUELLE POUR LES TESTS SPATIAUX	262
TABLEAU 127.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LA FORMATION, A LA PRATIQUE ANTERIEURE DE LOGICIELS DE MODELISATION ET AU NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES	264
TABLEAU 128.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES ET LE NIVEAU D'ANGLAIS POUR LES TESTS SPATIAUX	266
TABLEAU 129.	MOYENNES MARGINALES ESTIMEES POUR LES INTERACTIONS NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES ET SCORES DE TOEIC ET PERFORMANCE AU PSVT:V	268
TABLEAU 130.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUE PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE POUR LES TESTS SPATIAUX	269
TABLEAU 131.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE POUR LES TESTS SPATIAUX	270
TABLEAU 132.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE POUR LES TESTS SPATIAUX	270
TABLEAU 133.	DISTRIBUTION DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE POUR LES TESTS SPATIAUX	271
TABLEAU 134.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE POUR LES TESTS SPATIAUX	271
TABLEAU 135.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION AU MCT ET LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE.....	272
TABLEAU 136.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION AU MRT ET LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE.....	273
TABLEAU 137.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION AU CFT ET LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE.....	274
TABLEAU 138.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION DU MRT ET LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	274
TABLEAU 139.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUE PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE POUR LES TESTS SPATIAUX	276
TABLEAU 140.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE POUR LES TESTS SPATIAUX	276
TABLEAU 141.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE POUR LES TESTS SPATIAUX.....	277
TABLEAU 142.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D (C3D) PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE POUR LES TESTS SPATIAUX	277
TABLEAU 143.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE POUR LES TESTS SPATIAUX	277
TABLEAU 144.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION DU PSVT:V ET LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE	278
TABLEAU 145.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'ÉVOLUTION DU R PSVT:R ET LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES A L'ÂGE ADULTE.....	279

TABLEAU 146.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DU PSVT:V ET LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION PRATIQUES A L'AGE ADULTE.....	279
TABLEAU 147.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DU MCT ET LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION PRATIQUES A L'AGE ADULTE.....	280
TABLEAU 148.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DU PSVT:V ET LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE.....	280
TABLEAU 149.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES GROUPES DE PERFORMANCE ACADEMIQUE POUR LES TESTS SPATIAUX	281
TABLEAU 150.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LE NOMBRE DE STRATEGIES, LE CHANGEMENT DE STRATEGIE ET LES COMBINAISONS DE STRATEGIES POUR LES TESTS SPATIAUX	284
TABLEAU 151.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DU PSVT:V ET LES CATEGORIES DE NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES DANS LES VERBATIM	285
TABLEAU 152.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DU PSVT:V ET LES CATEGORIES DE COMBINAISONS DE STRATEGIES DECLAREES DANS LES QCM	286
TABLEAU 153.	RECAPITULATIF DES RESULTATS SIGNIFICATIFS ET FAIBLEMENT SIGNIFICATIFS DES HYPOTHESES EHS LIEES AUX SCORES SPATIAUX	291
TABLEAU 154.	RESULTATS DU TEST DE NORMALITE DES SCORES DE MODELISATION AUX DEUX RECUEILS (N = 98).....	295
TABLEAU 155.	GAINS MOYENS DES SCORES A L'EXERCICE DE MODELISATION ENTRE LES DEUX RECUEILS ET ECART-TYPE	296
TABLEAU 156.	CATEGORIES DE VARIABLES REGROUPEES POUR LES ANOVA RELATIVES A L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION VOLUMIQUE.....	297
TABLEAU 157.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LA FORMATION, LA PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION ET LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES POUR L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION	298
TABLEAU 158.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION ET LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES	299
TABLEAU 159.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES ET LE NIVEAU D'ANGLAIS POUR L'EXERCICE DE MODELISATION.....	301
TABLEAU 160.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUE (DEPP) PRATIQUES A L'AGE ADULTE POUR L'EXERCICE DE MODELISATION	302
TABLEAU 161.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES (MR) PRATIQUES A L'AGE ADULTE POUR L'EXERCICE DE MODELISATION.....	302
TABLEAU 162.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D (2D) PRATIQUES A L'AGE ADULTE POUR L'EXERCICE DE MODELISATION.....	303
TABLEAU 163.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D (C3D) PRATIQUES A L'AGE ADULTE POUR L'EXERCICE DE MODELISATION.....	303
TABLEAU 164.	DISTRIBUTION CORRIGEE DES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES (ART) PRATIQUES A L'AGE ADULTE POUR L'EXERCICE DE MODELISATION	303
TABLEAU 165.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION ET LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	304
TABLEAU 166.	TESTS DES EFFETS SIMPLES METTANT EN REGARD L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION ET LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	305
TABLEAU 167.	TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE ADOPTEE AUX DEUX RECUEILS	307
TABLEAU 168.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES AVORTEMENT.....	311
TABLEAU 169.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES ERREURS	312
TABLEAU 170.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES FACTORISATION.....	312
TABLEAU 171.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES NOMBRE D'ACTIONS	313
TABLEAU 172.	TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES TEMPS DE REALISATION	313
TABLEAU 173.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES SCORES DE MODELISATION DES RECUEILS 1 ET 2	314
TABLEAU 174.	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU TEMPS DE REALISATION DES DEUX RECUEILS	315
TABLEAU 175.	RECAPITULATIF DES RESULTATS DES HYPOTHESES EQMV	317
TABLEAU 176.	CARACTERISTIQUES DES CINQ TESTS SPATIAUX.....	326
TABLEAU 177.	CARACTERISTIQUES LIEES A LA MODELISATION DES CINQ TESTS SPATIAUX	332
TABLEAU 178.	CARACTERISTIQUES DES EVOLUTIONS DES CINQ TESTS SPATIAUX.....	339

Annexes

ANNEXE 1. FICHE DE POSTE DOCTORAT EXAPP_3D.....	383
ANNEXE 2. COMMUNICATION PERSONNELLE A.R. KUSE, 25 JUIN 2018.....	386
ANNEXE 3. COMMUNICATION PERSONNELLE S.Y. YOON, 07 JUIN 2018.....	387
ANNEXE 4. COMMUNICATION PERSONNELLE S.Y. YOON, 16 MAI 2018.....	389
ANNEXE 5. QUESTIONNAIRE A CHOIX MULTIPLE STRATEGIES PSVT:V	390
ANNEXE 6. QUESTIONNAIRE A CHOIX MULTIPLE STRATEGIES R PSVT:R	390
ANNEXE 7. QUESTIONNAIRE A CHOIX MULTIPLE STRATEGIES MRT	391
ANNEXE 8. QUESTIONNAIRE A CHOIX MULTIPLE STRATEGIES MCT	391
ANNEXE 9. QUESTIONNAIRE A CHOIX MULTIPLE STRATEGIES CFT	391
ANNEXE 10 – TUTORIEL DE MODELISATION	392
ANNEXE 11. QUESTIONNAIRES LOISIRS	405
ANNEXE 12. FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	407
ANNEXE 13. KIT D'ENCODAGE DES VERBATIM	408
TABLEAU A1 – TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE R PSVT:R1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES	413
TABLEAU A2 – TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE MRT1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES	414
TABLEAU A3 – TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE MCT1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES	415
TABLEAU A4 – TABLE DE FREQUENCE DES STRATEGIES IDENTIFIEES DANS LE CFT1 A PARTIR DE L'ENCODAGE DES VERBATIM STRATEGIES	416
TABLEAU A5 – GRILLE D'ENCODAGE DU QCM STRATEGIES R PSVT:R	416
TABLEAU A6 – GRILLE D'ENCODAGE DU QCM STRATEGIES MRT	417
TABLEAU A7 – GRILLE D'ENCODAGE DU QCM STRATEGIES MCT	417
TABLEAU A8 – GRILLE D'ENCODAGE DU QCM STRATEGIES CFT	417
TABLEAU A9 – AFFECTATION D'UN INDICE AUX CATEGORIES DE LA DIMENSION MANIPULATOIRE	417
TABLEAU A10 – AFFECTATION D'UN INDICE AUX CATEGORIES DE LA DIMENSION 2D	417
TABLEAU A11 – AFFECTATION D'UN INDICE AUX CATEGORIES DE LA DIMENSION CONSTRUCTION 3D	418
TABLEAU A12 – AFFECTATION D'UN INDICE AUX CATEGORIES DE LA DIMENSION ARTISTIQUE	418
TABLEAU A13 – COMBINAISON DES INDICES DE LA DIMENSION MANIPULATOIRE	418
TABLEAU A14 – DEFINITIONS DES INDICES DIMENSIONNELS DE LA DIMENSION MANIPULATOIRE	419
TABLEAU A15 – COMBINAISON DES INDICES DE LA DIMENSION 2D	420
TABLEAU A16 – COMBINAISON DES INDICES DE LA DIMENSION CONSTRUCTION 3D	420
TABLEAU A17 – COMBINAISON DES INDICES DE LA DIMENSION ARTISTIQUE	420
ANNEXE 14. KIT D'ENCODAGE ONSHAPE	421
FIGURE A1 – DISTRIBUTION DES SCORES DU R PSVT:R1.....	426
FIGURE A2 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MRT1.....	426
FIGURE A3 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MCT1.....	427
TABLEAU A18 - RECAPITULATIF DU TEST U DE MANN-WHITNEY POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA FILIERE D'ORIGINE	427
TABLEAU A19 – RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LA PREVALENCE MANUELLE	427
FIGURE A4 – DISTRIBUTION DU PSVT:V1 SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES APPRISES.....	428
FIGURE A5 - DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES APPRISES	428
FIGURE A6 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LA PRATIQUE DE LOGICIELS.....	428
FIGURE A7 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LA PRATIQUE DE LOGICIELS.....	429
FIGURE A8 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LE NOMBRE DE LOGICIELS PRATIQUES.....	429
FIGURE A9 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LE NOMBRE DE LOGICIELS PRATIQUES	430
FIGURE A10 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS AVEC DEPLACEMENTS PHYSIQUES ET/OU VIRTUELS PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	430
FIGURE A11 – DISTRIBUTION DU MRT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS AVEC DEPLACEMENTS PHYSIQUES ET/OU VIRTUELS PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	431
FIGURE A12 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS AVEC DEPLACEMENTS PHYSIQUES ET/OU VIRTUELS PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	431

FIGURE A13 – DISTRIBUTION DU PSVT:V1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	432
FIGURE A14 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	433
FIGURE A15 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	433
FIGURE A16 – DISTRIBUTION DU MRT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	434
FIGURE A17 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	434
FIGURE A18 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LES LOISIRS DE CONSTRUCTION PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	435
FIGURE A19 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	435
FIGURE A20 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	436
FIGURE A21 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	436
FIGURE A22 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	437
FIGURE A23 – DISTRIBUTION DU R PSVT:R1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	437
FIGURE A24 – DISTRIBUTION DU PSVT:V1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D PRATIQUES A L'AGE ADULTE	438
FIGURE A25 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D PRATIQUES A L'AGE ADULTE	438
TABLEAU A26 – TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LE R PSVT:R1, MRT1, MCT1 ET CFT1 DANS LES VERBATIM STRATEGIES	439
TABLEAU A27 – TABLE DE FREQUENCE DU NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LE R PSVT:R1, MRT1, MCT1 DANS LE QCM STRATEGIES	439
FIGURE A28 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON LE NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES QCM STRATEGIES	440
FIGURE A29 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LE NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES QCM STRATEGIES	440
FIGURE A30 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON QUE LES ETUDIANTS DECLARENT UTILISER UNE OU PLUSIEURS STRATEGIES DANS LES QCM STRATEGIES	441
FIGURE A31 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON QUE LES ETUDIANTS DECLARENT UTILISER UNE OU PLUSIEURS STRATEGIES DANS LES QCM STRATEGIES	441
TABLEAU A20 - COMPARAISONS APPARIEES DE COMBINAISON – SCORES DE MCT1	442
FIGURE A33 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON QUE LES COMBINAISONS DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES QCM STRATEGIES	443
FIGURE A34 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON LES COMBINAISONS DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES QCM STRATEGIES	443
TABLEAU A21 – TABLE DE FREQUENCE DU CHANGEMENT DE STRATEGIE POUR LE R PSVT:R1, LE MRT1, LE MCT1 ET LE CFT1 D'APRES LES VERBATIM STRATEGIES	444
FIGURE A35 – DISTRIBUTION DU MRT1 SELON QUE LES ETUDIANTS DECLARENT CHANGER DE STRATEGIE DANS LES VERBATIM STRATEGIES	444
FIGURE A36 – DISTRIBUTION DU MCT1 SELON QUE LES ETUDIANTS DECLARENT CHANGER DE STRATEGIE DANS LES VERBATIM STRATEGIES	445
FIGURE A37 – DISTRIBUTION DU CFT1 SELON QUE LES ETUDIANTS DECLARENT CHANGER DE STRATEGIE DANS LES VERBATIM STRATEGIES	445
FIGURE A38 – DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON QUE LES ETUDIANTS ONT PRATIQUE DES LOGICIELS DE MODELISATION	446
FIGURE A39 – DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION QUE LES ETUDIANTS ONT PRATIQUES	446
TABLEAU A22 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES DYNAMIQUES (DEP) – ENFANCE ET ADOLESCENCE (N = 129)	447

TABLEAU A23 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES MANIPULATOIRES (M) – ENFANCE ET ADOLESCENCE (N = 129).....	447
TABLEAU A24 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES 2D – ENFANCE ET ADOLESCENCE (N = 129)	447
TABLEAU A25 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES CONSTRUCTION 3D (C3D) – ENFANCE ET ADOLESCENCE (N = 129).....	448
TABLEAU A26 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES ARTISTIQUES (ART) – ENFANCE ET ADOLESCENCE (N = 129).....	448
TABLEAU A27 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES DYNAMIQUES (DEP) – ÂGE ADULTE (N = 129)	448
TABLEAU A28 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES MANIPULATOIRES (M) – ÂGE ADULTE (N = 129).....	449
TABLEAU A29 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES 2D (2D) – ÂGE ADULTE (N = 129)	449
TABLEAU A30 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES CONSTRUCTION 3D (C3D) – ÂGE ADULTE (N = 129)	449
TABLEAU A31 – TABLE DE FREQUENCE DES CATEGORIES ARTISTIQUES (ART) – ÂGE ADULTE (N = 129).....	450
FIGURE A40 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LE NOMBRE DE VOLUMES FONCTIONNELS PRODUIT	450
FIGURE A41 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES –PERÇAGE	451
FIGURE A42 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – ESQUISSES - PERÇAGE.....	451
TABLEAU A30 – RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LES CATEGORIES PERÇAGE - ESQUISSES - VOLUMES 1	452
FIGURE A43 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LES CATEGORIES NOMBRE DE VOLUMES – EXTRUSIONS - PERÇAGE	452
TABLEAU A31 – RESULTATS DU TEST DE KRUSKAL-WALLIS POUR LE PSVT:V1, LE R PSVT:R1, LE MRT1 ET LE MCT1 ET LES CATEGORIES PERÇAGE - EXTRUSIONS - VOLUMES 1	452
FIGURE A44 – DISTRIBUTION DES SCORES DU PSVT:V1 SELON LES STRATEGIES DE LA LONGUEUR TOTALE.....	453
FIGURE A45 – DISTRIBUTION DES SCORES DU R PSVT:R1 SELON LES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE	453
FIGURE A46 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MRT1 SELON LES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE.....	454
FIGURE A47 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MCT1 SELON LES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE.....	454
FIGURE A48 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE.....	455
FIGURE A49 – DISTRIBUTION DES SCORES DU PSVT:V1 SELON LA JUSTESSE DE LA SYMETRIE	455
FIGURE A50 – DISTRIBUTION DES SCORES DU R PSVT:R1 SELON LA JUSTESSE DE LA SYMETRIE	455
FIGURE A51 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MCT1 SELON LA JUSTESSE DE LA SYMETRIE	456
FIGURE A52 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LA JUSTESSE DE LA SYMETRIE.....	456
FIGURE A53 – DISTRIBUTION DES SCORES DU PSVT:V1 SELON LES CATEGORIES L TOTALE - SYMETRIE.....	457
FIGURE A54 – DISTRIBUTION DES SCORES DU R PSVT:R1 SELON LES CATEGORIES L TOTALE - SYMETRIE.....	457
FIGURE A55 – DISTRIBUTION DES SCORES DU MCT1 SELON LES CATEGORIES L TOTALE - SYMETRIE.....	458
FIGURE A56 – DISTRIBUTION DES SCORES DU CFT1 SELON LES CATEGORIES L TOTALE - SYMETRIE	458
FIGURE A57 – DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LES STRATEGIES DE DEFINITION DE LA LONGUEUR TOTALE	459
FIGURE A58 – DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LES CATEGORIES L TOTALE – SYMETRIE 1	459
TABLEAU A32 – RECAPITULATIF DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET TESTS DE NORMALITE DES TESTS SPATIAUX AU DEUXIEME RECUEIL.....	460
FIGURE A59 - ÉVOLUTION DES SCORES DU PSVT:V	460
FIGURE A60 - ÉVOLUTION DES SCORES DU R PSVT:R.....	460
FIGURE A61 - ÉVOLUTION DES SCORES DU MRT	461
FIGURE A62 - ÉVOLUTION DES SCORES DU MCT	461
FIGURE A63 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MRT SELON LE GENRE ...	462
FIGURE A64 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MRT POUR LES ETUDIANTS AVEC ET SANS BAGAGE TECHNOLOGIQUE	462
FIGURE A65 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU R PSVT:R POUR LES ETUDIANTS AVEC ET SANS PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION	463

FIGURE A66 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MCT POUR LES ETUDIANTS AVEC ET SANS PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION.....	463
FIGURE A67 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU CFT POUR LES ETUDIANTS AVEC ET SANS PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION.....	464
FIGURE A68 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MCT SELON LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES AVANT DE REJOINDRE L' ECOLE.....	464
FIGURE A69 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V POUR LES ETUDIANTS AYANT APPRIS UNE ET DEUX LANGUES MATERNELLES	465
FIGURE A70 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU R PSVT:R SELON LE NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES	465
FIGURE A71 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V POUR LES GROUPES DE TOEIC	466
FIGURE A72 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU R PSVT:R SELON LE NIVEAU D'ANGLAIS DES ETUDIANTS.....	466
TABLEAU A32 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES, SCORES DE TOEIC ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU R PSVT:R.....	467
TABLEAU A33 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS NOMBRE DE LANGUES MATERNELLES, SCORES DE TOEIC ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU CFT	467
FIGURE A73 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MCT SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	468
FIGURE A74 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MRT SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	468
FIGURE A75 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU CFT SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	469
FIGURE A76 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MRT SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS 2D PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE	469
TABLEAU A34 – MOYENNES MARGINALES ESTIMEES POUR LES INTERACTIONS LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D ET ARTISTIQUES PRATIQUES DANS L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU PSVT:V	470
FIGURE A77 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V POUR LES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES A L'AGE ADULTE	471
FIGURE A78 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU R PSVT:R SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS MANIPULATOIRES PRATIQUES A L'AGE ADULTE.....	472
FIGURE A79 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D A L'AGE ADULTE.....	472
FIGURE A80 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU MCT POUR LES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DE CONSTRUCTION 3D A L'AGE ADULTE.....	473
FIGURE A81 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVT:V POUR LES ETUDIANTS SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES A L'AGE ADULTE	473
TABLEAU A35 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE MSOL, SCORES D'AMEC ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU PSVT:V.....	474
TABLEAU A36 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE PCAT, SCORES D'ALGO ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU MRT.....	475
TABLEAU A37 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE PCAT, SCORES D'ALGO ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU CFT	476
TABLEAU A38 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE PCAT, SCORES D'AMEC ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU MRT.....	477
TABLEAU A39 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE MAPP, SCORES D'ALGO ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU MRT.....	478
TABLEAU A40 – MOYENNES MARGINALES ESTIMEES POUR LES INTERACTIONS SCORES DE MAPP, SCORES DE PCAT, SCORES D'ALGO ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE AU MRT	479
FIGURE A82 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVTV SELON LE NOMBRE DE STRATEGIES DECLAREES MOBILISEES DANS LES VERBATIM	481
FIGURE A83 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DU PSVTV SELON LA COMBINAISON DE STRATEGIES DECLAREE MOBILISEE DANS LES QCM AU RECUEIL 2	481
FIGURE A84 – ÉVOLUTION DES SCORES DE MODELISATION (N = 98).....	482

FIGURE A85 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DE MODELISATION SELON LE BAGAGE TECHNOLOGIQUE DES ETUDIANTS	482
FIGURE A86 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DE MODELISATION SELON LES CATEGORIES DE PRATIQUE DE LOGICIELS DE MODELISATION	483
FIGURE A87 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DE MODELISATION SELON LE NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES.....	483
TABLEAU A41 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS FORMATION ANTERIEURE, PRATIQUE DE LOGICIELS ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION	484
TABLEAU A42 – MOYENNES MARGINALES POUR LES INTERACTIONS FORMATION ANTERIEURE, NOMBRE DE LOGICIELS DE MODELISATION PRATIQUES ET EVOLUTION DE LA PERFORMANCE EN MODELISATION ...	485
FIGURE A88 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DE MODELISATION SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS DYNAMIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	486
FIGURE A89 – DIAGRAMME DES MOYENNES MARGINALES DES DEUX RECUEILS DE MODELISATION SELON LES CATEGORIES DE LOISIRS ARTISTIQUES PRATIQUES A L'AGE ADULTE	486
FIGURE A90 - DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LA CATEGORIE AVORTEMENT – RECUEIL 2	487
FIGURE A91 - DISTRIBUTION DES SCORES DE MODELISATION SELON LA CATEGORIE ERREUR – RECUEIL 2	487
FIGURE A92 - ÉVOLUTION DU TEMPS DE REALISATION.....	488
FIGURE A93 - ÉVOLUTION DU NOMBRE D' ACTIONS.....	488
FIGURE A94 - ÉVOLUTION DU NOMBRE D' ACTIONS DE TATONNEMENT	488
TABLEAU A43 - ANALYSE FFOM DU PROTOCOLE D'ENREGISTREMENT.....	489

Annexe 1. Fiche de poste Doctorat EXAPP_3D



Fiche de Poste : doctorant/chercheur (version 1.0)

Date : 29 Mai 2017

Institutions : SupMeca, UCP, Université Paris Seine

Thématique du programme de recherche : Expérimenter l'Apprentissage par Problèmes et Projets via la conception 3D / EXAPP_3D

Objectif de recherche : 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

Ecole doctorale : Université de Cergy-Pontoise

Unité de recherche : TechEduLab & Supméca

Encadrement : Co-encadrement

- ☐ 3D/Science de l'ingénieur : Supméca
- ☐ Science de l'éducation : UCP

Financement : Contrat doctoral pour une durée maximale de 3 années à compter du 1 Septembre 2017 avec reconduction non-tacite soumise à la validation du comité de thèse. Rémunération nette d'environ 1 400€/mois avec mise à disposition ordinateur, logiciels, bureau sur le site de Cergy-Hirsch et laboratoire d'expérimentation disposant d'outils d'enregistrement de comportements en situation de pratique d'enseignement-apprentissage.

Localisation : 80% - Cergy, 20% St Ouen

Profil du candidat et compétences :

- ☐ Savoir : Sciences de l'éducation / Ingénierie Systèmes / Pédagogie par projet / transformation pédagogique ;
- ☐ Savoir-Faire : modélisation systèmes / simulation / conception / rédaction d'article / 3D / 3DExperience-3DS
- ☐ Savoir-être : adaptabilité / autonomie / sens de la communication / animation de réseau / rigueur / réactivité / gestion de projet

Suivi du programme de recherche : mise en place d'indicateurs + suivi par comité de thèse

Contexte scientifique :

La problématique de la 3D dans un cadre d'apprentissage par problèmes et projets sera abordée sous 3 aspects : 1) représentation d'objets fixes ou animés 2) développement de capacités spatiales et 3) capacité motivationnelle comme catalyseur de lutte contre le décrochage et engagement dans des filières techniques et industrielles, donc ce que la 3DExpérience permet ou rend visible (1), ce que sa pratique développe en termes de savoir de modélisation et spatialisation (2) et (3), ce qu'elle encourage ou pas en termes de développement personnel. Les travaux de recherche *a priori* convoqués sont :

- ☐ Les capacités spatiales progressent significativement (Lin, 2015, S. Sorby et al., 2013 ; Uttal et al., 2013), à l'aide d'activités s'appuyant sur des modèles 3D (Ault & John, 2010 ; Martín-Dorta, Saorín, & Contero, 2008 ; Onyancha, Derov, & Kinsey, 2009 ; S. Sorby, Casey, Veurink, & Dulaney, 2013 ; Veurink et al., 2009) ;
- ☐ Les capacités spatiales sont corrélées à la qualité de production de dessins en 3D en conception mécanique (Branoff & Dobelis, 2013) ;
- ☐ Les scores aux tests de mesures des capacités spatiales sont significativement liés au genre (Cooke-Simpson & Voyer, 2007 ; Maeda & Yoon, 2012 ; Moè, 2009 ; Tsutsumi, Schroecker, Stachel, & Weiss, 2005) ;
- ☐ La Compréhension d'objets complexes est favorisée par les animations 3D (Wu & Chiang, 2013) ;

- ☐ Absence d'effet significatif entre la nature du modèle (3D virtuel, statique ou dynamique ou 3D réel dynamique) sur la capacité à correctement produire une vue en coupe de l'objet présenté (Katsioloudis, Dickerson, Jovanovic, & Jones, 2015) ;
- ☐ Les apprenants sont plus prolifiques, du point de vue de la créativité fonctionnelle, lorsqu'ils dessinent à la main qu'avec un modèleur 3D (Laisney & Brandt-Pomares, 2014) ;
- ☐ Absence de lien significatif entre la créativité, en termes de fonctionnalité des solutions conçues avec un modèleur 3D et les capacités spatiales (Chang, 2014) ;
- ☐ Les efforts des apprenants dans une activité de conception avec des outils de CAO sont plus tournés vers la maîtrise de l'outil lui-même plutôt que vers la production de solutions (Géronimi, de Vries, Prudhomme, & Baillé, 2005)...

Le modèle personnel de production de savoirs de Lerbert (1984) propose une structuration du processus en trois phases : système d'entrée, de traitement et de sortie. Dans cette perspective, une approche de type clinique sera mise en œuvre avec maîtrise en laboratoire des variables différenciantes. Il est donc question ici d'exploiter des tests normés pour mesurer les capacités spatiales avant (entrée) et après (sortie) d'activités déjà mesurées par la recherche comme ayant un impact : tests de mesure des capacités spatiales à l'aide du Purdue Spatial Visualisation Test- Mental Rotation – PSVT-R – (Guay, 1976), du Mental Cutting Test – MCT – (CEEB, 1939), du differential aptitude test : spatial relations – DAT : SR – (Bennett, Seashore & Wesman, 1973) et du Mental Rotation Test – MRT – (Vandenberg & Kuse, 1978).

A la suite de ce premier travail exploratoire (année-1), le dispositif de recherche sera mis à l'échelle pour le tester dans un échantillon représentatif du corpus cible. Il est donc question ici de passer de l'expérience en laboratoire avec maîtrise des conditions, à l'expérience en contexte réel, permettant ainsi de valider ou non les hypothèses précédemment fondées (année-2). Enfin, un travail de dissémination de ce programme de recherche sera programmé pour la troisième année.

Programme de livrables :

Année-1 :

- ☐ Revue de la littérature, définition du plan de variables et du protocole de recherche ;
- ☐ Mise en œuvre dudit protocole en laboratoire avec échantillon représentatif ;
- ☐ Analyse des données et constitution d'hypothèses fondées ;
- ☐ Soumission d'un poster à un colloque ;

Année-2 :

- ☐ Mise à l'échelle ;
- ☐ Expérimentation sur échantillon représentatif du corpus cible ;
- ☐ Application du protocole de recherche à plus grande échelle ;
- ☐ Analyse des données et validation totale ou partielle des hypothèses fondées ;
- ☐ Soumission d'une communication à un colloque ;

Année-3 :

- ☐ Variation du plan de variable pour consolidation du modèle scientifique en construction ;
- ☐ Proposition de modèle scientifique ;
- ☐ Soumission d'un article de recherche.

Procédure de candidature :

Pour candidater, envoyer un curriculum vitae détaillé, une lettre de motivation, une copie du



diplôme de Master 2, un relevé de notes de master, le mémoire de Master 2, une lettre de recommandation du directeur/de la directrice du mémoire de Master 2, un résumé des travaux de recherche antérieurs (mémoire de master, projets de recherche, etc.) avant le 09 Juillet 2017, 23hr (Hr-Paris) aux deux adresses suivantes :

- ☐ alexis.francois@supmeca.fr
- ☐ laurent.jeannin@u-cergy.fr

Après examen des candidatures, les candidats retenus seront convoqués et entendus par une commission ad hoc. La date des entretiens sera communiquée aux candidats par voie électronique et se dérouleront entre le 11 Juillet 2017, pour un classement prononcé au plus tard le 12 Juillet.

Annexe 2. Communication personnelle A.R. Kuse, 25 juin 2018

RE: Scoring Mental Rotations Test - CHARLES Sophie

<https://webmail.supmeca.fr/owa/#viewmodel=ReadMessageItem&...>

RE: Scoring Mental Rotations Test

Allan Kuse <allankuse@themasb.org>

Mon 6/25/2018 6:41 PM

To: CHARLES Sophie <sophie.charles@supmeca.fr>;

Dear Sophie,

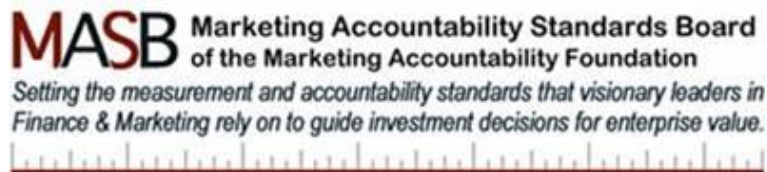
Again, the time allotted for the test should be determined by the sample being tested. If you are using the Crawford form of the test, and that was a sample of undergraduate students, using the same 2 x 3 minute timing makes sense. In the studies we conducted, there was at least one intervening test instrument – though not a test of spatial visualization. The duration of the interval was never studied, so it likely will be determined by the length of your test battery.

In our procedures, no other papers were present and it was unusual for subjects to draw on the test sheets – it is a test of visualization.

Regards,

Allan

Allan R Kuse, PhD
MMAF Center Auditor
219-322-6668 / 219-743-6210 (mobile)
theMASB.org



From: CHARLES Sophie <sophie.charles@supmeca.fr>
Sent: Monday, June 25, 2018 6:09 AM
To: Allan Kuse <allankuse@themasb.org>
Subject: RE: Scoring Mental Rotations Test

Dear Alan,

thank you for your good wishes.

RE: [PSVT:R] RE: Doctoral student investigating spatial ability

So Yoon Yoon <soyoon@tamu.edu>

Jeu 07/06/2018 17:39

À : CHARLES Sophie <sophie.charles@supmeca.fr>

2 pièces jointes (1 Mo)

Yoon2011.Revised PSVT-R+AswrSheet.V4.pdf; Yoon2011.Revised PSVT-R.DemographicSurvey for Undergraduate Students.doc;

Dear Sophie,

I appreciate the introduction about the research project. Now, I understand the need of the Revised PSVT:R for your research.

Attached is the final version of the Revised PSVT:R with the answer key. You can also create an online version of the Revised PSVT:R using this paper-and-pencil based version. **The use of the Revised PSVT:R is limited to the intended project as you informed to me. Please do not distribute the test to others and keep the copies of the test strictly confidential after your administration of the test.** This is for the integrity of future projects by other researchers.

If you agree on the condition for the use of the Revised PSVT:R, then reply back to me.

Here is the citation for the instrument.

Yoon, S. Y. (2011). *Revised Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations (Revised PSVT:R)* [Psychometric Instrument].

For the psychometric properties of the Revised PSVT:R, you can refer my dissertation or other papers.

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).

Maeda, Y., Yoon, S. Y., Kim-Kang, K., & Imbrie, P. K. (2013). Psychometric properties of the Revised PSVT:R for measuring the first year engineering students' spatial ability. *International Journal of Engineering Education*, 29, 763-776.

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, 69-94. doi: 10.1007/s10648-012-9215-x

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, 397-403. doi: 10.1177/0734282915609843

Yoon, S. Y., & Min, K-H. (2016). College students' performance in an introductory atmospheric science course: Associations with spatial ability. *Meteorological Applications*, 23, 409-419. doi: 10.1002/met.1565

Yoon, S. Y., & Mann, E. L. (2017). Exploring spatial ability of undergraduate students: Association with gender, STEM majors, and gifted program experiences. *Gifted Child Quarterly*, 61(4), 313-327. doi: 10.1177/0016986217722614

Currently, I am working on a technical manual for the Revised PSVT:R. To do this, I need to standardize the Revised PSVT:R using samples around the world, which can be representative of the total population. Because of this, I'd like to contact you in the future around the time when you're done with the research project. If you can share your raw data (which should be anonymous) and results or publications regarding the project with me, I'll really appreciate it. In the manual, your publications will be documented to inform other researchers about the use of the test in various educational and research settings and results regarding the test.

Your raw data will be a part of a database for this standardization project and the standardization of the Revised PSVT:R will benefit all researchers using the Revised PSVT:R. To do this, I've also included [an example demographic survey](#) to get consistent demographic information of participants. If you can incorporate such fundamental demographic questions in your survey after modification for your participants and share the raw but anonymous data with me, it would be a big help for this project. Accordingly, I'll submit an IRB application for the use of secondary data when I am ready for analyses.

If you have any questions regarding the Revised PSVT:R and its administration, please feel free to contact me.

Sincerely,

Yoon

So Yoon Yoon, Ph. D. | Assistant Research Scientist
 Institute for Engineering Education and Innovation (IEEI)
 College of Engineering | Texas A&M University | TEES

EABB, 3127 TAMU | College Station, TX 77843-3127
 E: soyoon@tamu.edu | O: 979.847.2556 | F: 979.847.8654
[Google Scholar Citations](#) | [LinkedIn](#) | [ResearchGate](#) | [Publons](#)

From: CHARLES Sophie <sophie.charles@supmeca.fr>
Sent: Wednesday, June 06, 2018 10:56 AM
To: So Yoon Yoon <soyoon@tamu.edu>
Subject: RE: [PSVT:R] RE: Doctoral student investigating spatial ability

Thank you for your reply.

I am about to enroll on a doctorate course with Institut Supérieur de Mécanique de Paris (a French engineering school) and Université de Cergy Pontoise. My thesis will be in Education and deal with the impact of spatial ability on engineering students' modeling abilities. My directors are Alain Rivière, professor in Mechanics and head of Institut Supérieur de Mécanique de Paris, and Alain Jaillet, professor in Education and head of Techedulab at Université de Cergy-Pontoise.

Annexe 4. Communication personnelle s.Y. Yoon, 16 mai 2018

RE: [PSVT:R] RE: Doctoral student investigating spatial ab... ..

<https://webmail.supmeca.fr/owa/#viewmodel=ReadMessageIt...>

Cc: ymaeda@purdue.edu

Subject: RE: Doctoral student investigating spatial ability

Thank you very much for your advice and the references you recommended.

Best regards,

Sophie CHARLES

Ingénieur d'études - Research Engineer

Supméca - Institut Supérieur de Mécanique de Paris

[3 rue Fernand Hainaut](#) 93407 Saint-Ouen cedex - France

Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

École partenaire du Groupe ISAE – www.supmeca.fr

From: So Yoon Yoon <soyoon@tamu.edu>

Sent: Wednesday, May 16, 2018 5:45 PM

To: CHARLES Sophie

Cc: ymaeda@purdue.edu

Subject: RE: Doctoral student investigating spatial ability

Dear Sophie,

According to our studies, the time limit condition may affect student performance on the test because speededness as a confounding variable can influence student performance (scores). Therefore, I'd like to suggest to have your test condition without time limit as your participants sound like all undergraduate engineering students. According to our experiences, most of students will finish the 30 questions in 30 minutes. Instead, you can assess students' test-completion time as a variable (i.e., spatial problem solving speed) and explore its relationship with test scores.

It seems like you already located some of our papers, but just in case, I listed all here. My dissertation (Yoon, 2011), Maeda, Y., & Yoon, S. Y. (2013) and Yoon, S. Y., & Mann, E. L. (2017) have some discussions about the time limit conditions.

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).

Maeda, Y., Yoon, S. Y., Kim-Kang, K., & Imbrie, P. K. (2013). Psychometric properties of the Revised PSVT:R for measuring the first year engineering students' spatial ability. *International Journal of Engineering Education*, 29, 763-776.

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, 69-94. doi: 10.1007/s10648-012-9215-x

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, 397-403. doi: 10.1177/0734282915609843

Annexe 5. Questionnaire à choix multiple Stratégies PSVT:V

Choisissez la ou les réponses qui corresponde(nt) le plus à la/les stratégie(s) que vous avez adoptée(s) pour résoudre les problèmes. INDIQUEZ VOTRE RÉPONSE SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE QCM.

Pour trouver la réponse,

7. j'ai fait tourner la proposition dans ma tête pour la mettre dans la même position que l'objet dans le " cube de verre ".
8. j'ai fait tourner l'objet dans le " cube de verre " dans ma tête pour la mettre dans la même position que la proposition.
9. je me suis mis à la place du point de vue indiqué pour observer l'objet et voir à quoi il ressemblait à partir de ce point de vue.
10. j'ai imaginé l'objet à partir du point de vue indiqué pour voir à quoi il ressemblait à partir de ce point de vue.
11. je n'ai pas changé de point de vue. J'ai identifié un élément distinctif (e.g. une arrête, un arrondi sur la forme) et je l'ai cherché sur les propositions.
12. autre :

Annexe 6. Questionnaire à choix multiple Stratégies R PSVT:R

Choisissez la ou les réponses qui corresponde(nt) le plus à la/les stratégie(s) que vous avez adoptée(s) pour résoudre les problèmes. INDIQUEZ VOTRE RÉPONSE SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE QCM.

Pour trouver la réponse,

1. j'ai visualisé la/les rotation(s) à effectuer sur le premier objet et je l'ai/les ai reproduite(s) sur le deuxième objet en m'imaginant le manipuler.
2. je n'ai pas fait tourner la forme mentalement. J'ai visualisé l'objet à partir de différents points de vue pour choisir la réponse.
3. je n'ai pas fait tourner la forme mentalement. J'ai identifié un élément distinctif de l'exemple dans la première représentation et je l'ai cherché sur la forme dans la deuxième représentation. J'ai répété ce procédé sur la deuxième forme.
4. autre :

Annexe 7. Questionnaire à choix multiple Stratégies MRT

Choisissez la ou les réponses qui corresponde(nt) le plus à la/les stratégie(s) que vous avez adoptée(s) pour résoudre les problèmes. INDIQUEZ VOTRE RÉPONSE SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE QCM.

1. j'ai fait tourner la forme dans ma tête pour la mettre dans la même position que l'autre.
2. je n'ai pas fait tourner la forme mentalement. J'ai comparé les formes pour vérifier si elles étaient différentes ou identiques : le nombre de cubes, l'orientation du coude, etc.
3. je n'ai pas fait tourner la forme mentalement. J'ai imaginé une forme avec un début et une fin. Une fois que j'ai repéré le début, j'ai vérifié si la fin était identique à la forme du stimulus.
4. autre :

Annexe 8. Questionnaire à choix multiple Stratégies MCT

Choisissez la ou les réponses qui corresponde(nt) le plus à la/les stratégie(s) que vous avez adoptée(s) pour résoudre les problèmes. INDIQUEZ VOTRE RÉPONSE SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE QCM.

Pour trouver la réponse,

1. j'ai coupé la forme mentalement et j'ai regardé la forme résultant de la coupe, puis je l'ai cherchée dans les propositions.
2. j'ai regardé la forme en même que je la coupais mentalement et au fur et à mesure, j'ai cherché ce que je voyais être coupé dans les choix proposés.
3. j'ai tenu compte des grandeurs des angles et des segments.
4. autre :

Annexe 9. Questionnaire à choix multiple Stratégies CFT

Choisissez la ou les réponses qui correspond(ent) le plus à la/les stratégie(s) que vous avez adoptée(s) pour résoudre les problèmes. INDIQUEZ VOTRE RÉPONSE SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE QCM.

Pour trouver la réponse,

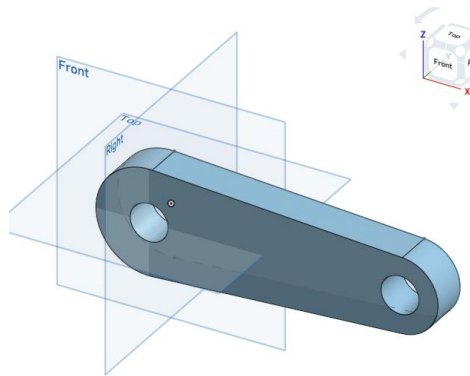
1. j'ai regardé la forme globale et je l'ai cherchée dans le motif.
2. j'ai regardé la forme globale et je l'ai déplacée dans le motif pour essayer de la trouver.
3. Autre



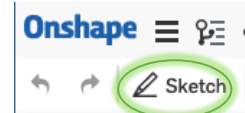
Tutoriel de modélisation

Objectifs :

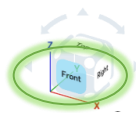
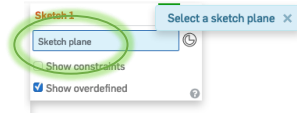
- ☐ prise en main de la plateforme Onshape
- ☐ modélisation d'un objet 3D



1. Créez une esquisse : cliquez sur Sketch.

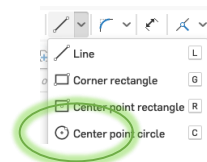


2. Choisissez le plan de l'esquisse : cliquez sur le plan Front.

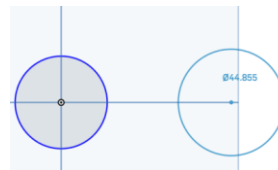




3. Cliquez à nouveau sur le plan Front sur le cube pour voir votre esquisse en 2D.


4. Ajoutez un cercle concentrique avec le centre du repère : sélectionnez l'icône Center point circle. Cliquez sur le centre du repère jusqu'à ce que le centre devienne jaune, puis cliquez une deuxième fois à l'écart du centre et lâchez.

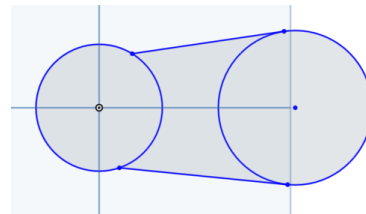


5. Ajoutez un deuxième cercle dont le centre est aligné à l'horizontal avec le premier cercle. Cliquez à droite du premier cercle sur l'axe horizontal, une ligne de pointillés jaunes apparaît, puis cliquez une deuxième fois à l'écart du centre et lâchez.



6. Vérifiez que les deux cercles sont bien alignés sur l'axe horizontal : sélectionnez l'icône Horizontal,  Search tools...  puis cliquez sur les centres de vos 2 cercles.

7. Tracez une ligne tangente aux 2 cercles. Pour ce faire, tracer un segment allant d'un cercle à l'autre : sélectionnez l'icône Line , cliquez sur le premier cercle, puis sur le deuxième, puis lâchez. Cliquez sur Esc.



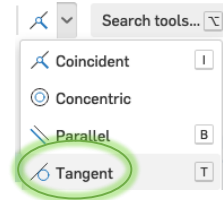
8. Tracez une deuxième tangente. Cliquez sur Esc.

Onshape

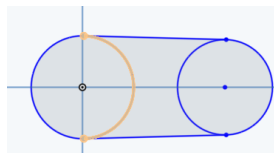
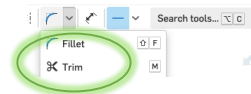
9. Assurez-vous que les deux droites sont bien tangentes avec les 2 cercles :

sélectionnez l'icône Tangent, cliquez sur une droite puis sur un cercle.

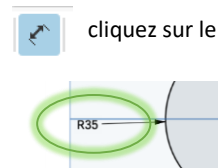
Les deux objets deviennent jaunes. Répétez l'opération jusqu'à ce que les deux cercles et les deux segments soient tangents. Vous ne pouvez sélectionner que 2 objets à la fois.



10. Éliminez les éléments superflus : sélectionnez l'icône Trim et cliquez sur les 2 demi-cercles à l'intérieur de la forme.

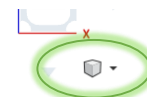


11. Dimensionnez vos éléments : sélectionnez l'icône Dimension, cliquez sur le cercle de gauche et attribuez un rayon de 35 mm. Répétez l'opération pour attribuer un rayon de 25 mm au 2e cercle.



Attribuez une distance de 165 mm entre les centres des cercles : cliquez sur le 1^{er} centre, puis sur le 2^e, puis entrez la valeur 165 mm.

12. Vous pouvez ajuster l'objet à votre fenêtre en sélectionnant Zoom to fit dans le menu Camera and render options.



13. Validez votre esquisse avec le bouton vert Check dans le menu Sketch 1.

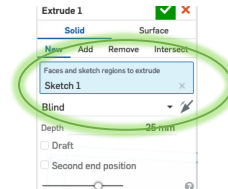


14. Cliquez sur l'icône Extrude .



15. Cliquez sur Sketch 1 dans le menu pour choisir la région à extruder.

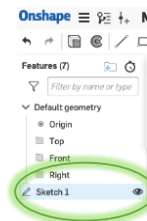
Conservez la valeur 25 mm de profondeur et l'orientation Blind
flèche descendante.



16. Validez l'extrusion avec le bouton vert Check dans le menu Extrude 1.

17. Vous pouvez visualiser l'extrusion en 3D avec un clic droit maintenu tout en faisant
glisser pour faire pivoter la pièce.

18. Créez une nouvelle esquisse Sketch et sélectionnez le plan Front.



19. Rendez l'esquisse 1 visible en ouvrant l'œil près de Sketch 1 dans le
menu Features.

20. Ajoutez deux cercles concentriques avec les cercles de Sketch 1.

21. Rendez les deux cercles de l'esquisse 2 identiques en
sélectionnant l'icône Equal, puis en cliquant sur les 2
cercles successivement.



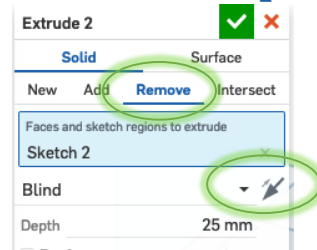
22. Vérifiez que les cercles de l'esquisse 1 sont concentriques avec les cercles de

l'esquisse 2. Sélectionnez l'icône Concentric, cliquez sur le demi-cercle de
l'esquisse 1 et le cercle de l'esquisse 2. Répétez l'opération pour la 2^e paire de
cercles.

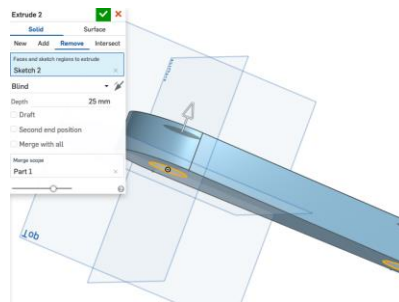
23. Dimensionnez les cercles de l'esquisse 2 avec un rayon de 12,5 mm ou un diamètre
de 25 mm.

24. Validez votre esquisse avec le bouton vert Check dans le menu Sketch 2.

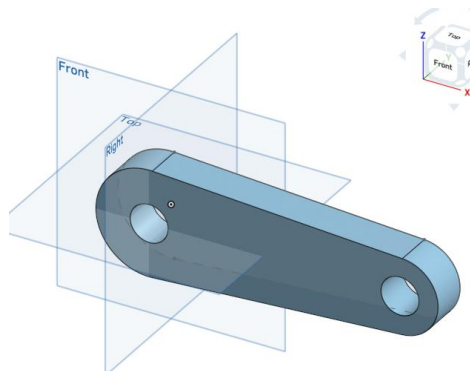
25. Extrudez l'esquisse 2 : sélectionnez Extrude, sélectionnez Sketch 2 comme région à extruder, choisissez Remove, conservez la profondeur de 25 mm, inversez le sens de l'extrusion : menu Blind flèche descendante.



26. Vérifiez le sens de l'extrusion en visualisant l'extrusion en 3D avec un clic droit et en glissant simultanément.



27. Validez l'extrusion avec le bouton vert
Check dans le menu Extrude 2. Votre pièce est terminée.



!💡 Astuces

- ☐ Vous pouvez supprimer un élément avec un clic droit qui fait apparaître un menu : choisissez Delete sketch entity.
- ☐ Vous pouvez annuler l'action précédente avec la flèche Undo.
- ☐ Vous pouvez rouvrir un Sketch fermé en double cliquant sur l'esquisse dans le menu Features ou en cliquant droit sur l'esquisse dans le menu Features, puis en sélectionnant Edit.



Enregistrement sur Camtasia

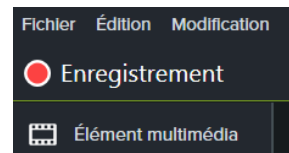
Objectifs :

- Enregistrer votre activité à l'écran
- Filmer la partie supérieure de votre corps

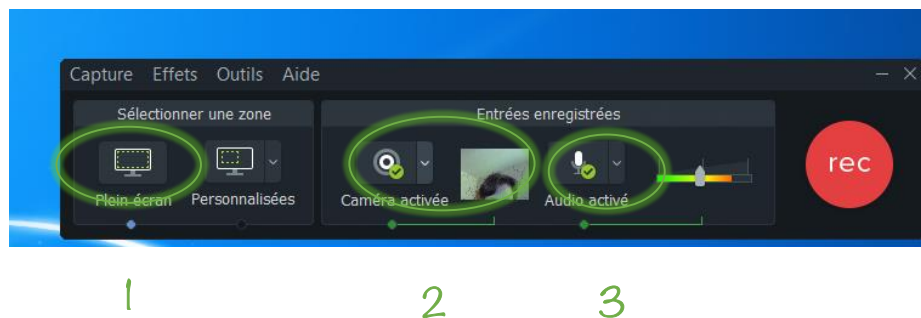
1. Lancez Camtasia : double-cliquez sur l'icône Camtasia bureau.



2. Cliquez sur Nouveau projet.
3. Cliquez sur le bouton Enregistrement.



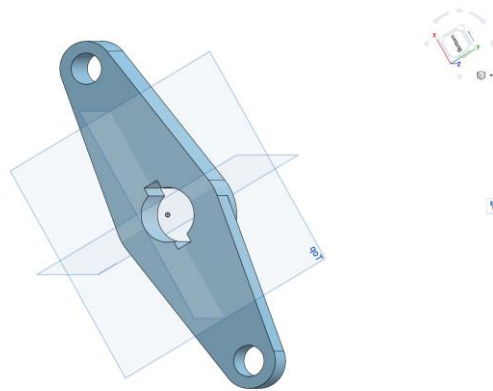
4. Vérifiez que les zones d'enregistrement bien sont le Plein écran (1), que la Caméra est activée (2) et que la Caméra sélectionnée est bien la Logitech Webcam C270. Vérifiez que le champ de la webcam contient la partie supérieure de votre corps, souris comprise en plaçant le curseur sur la fenêtre de la vidéo. Vérifiez que l'audio est activée (3).



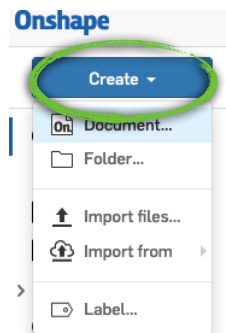
5. Appuyez sur le bouton rouge rec. Un compte à rebours de 3 secondes se déclenche.
6. Lorsque le compte à rebours est terminé, tournez la page et commencez l'exercice de modélisation. À partir de maintenant, votre activité est enregistrée.

Exercice de modélisation

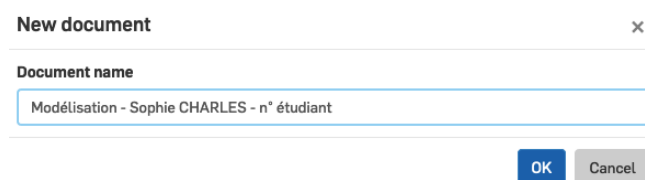
Objectif : Modéliser un objet en 3D



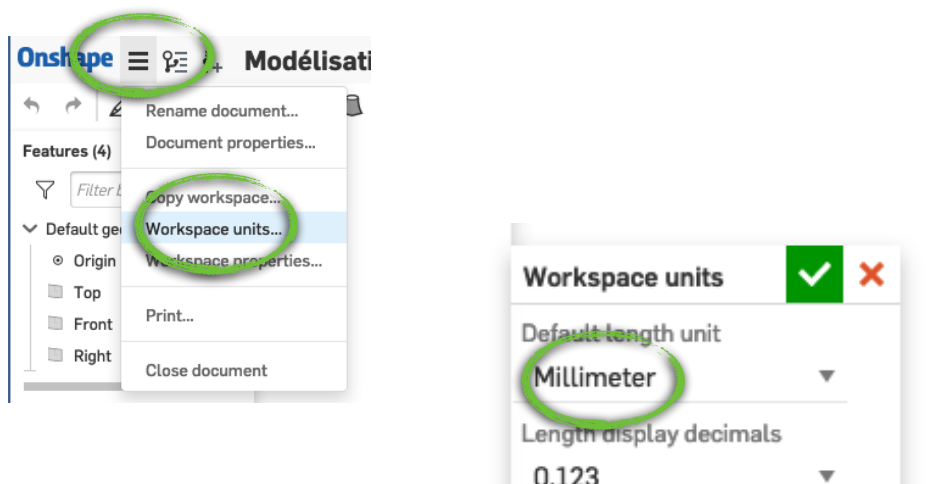
1. Créez un nouveau document.



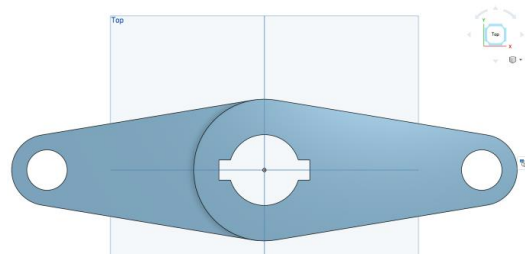
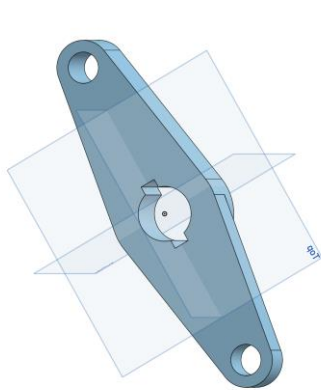
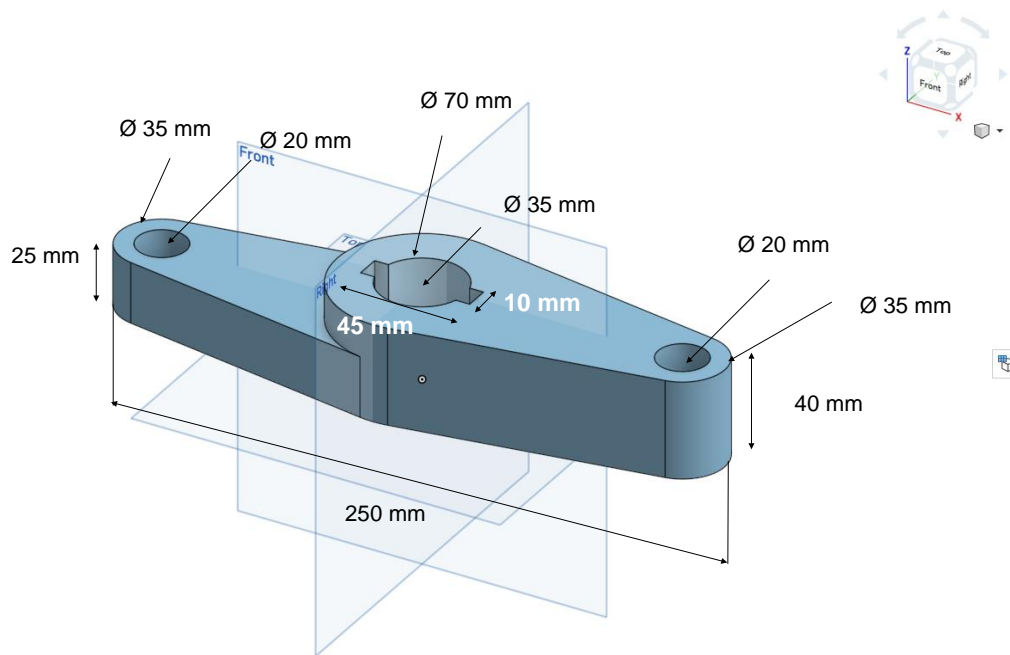
2. Nommez votre document : Modélisation – Prénom NOM – n° étudiant. Cliquez sur OK.



3. Vérifiez que les paramètres dimensions sont en mm.



4. Modélisez l'objet suivant.

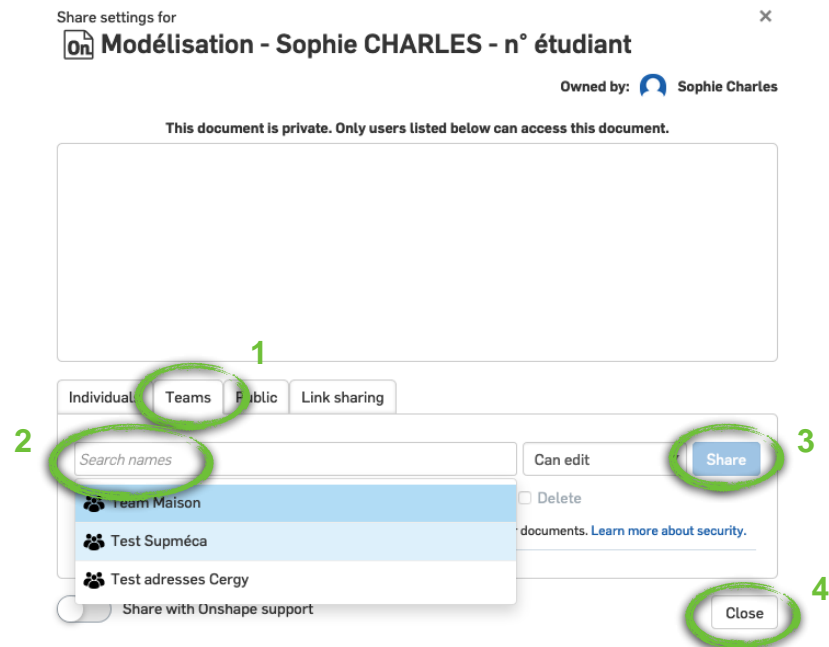


5. Lorsque vous avez terminé, partagez votre document avec votre Team (cf liste Identifiants).

Cliquez sur Share :



Sélectionnez l'onglet Teams (1), dans la case Search names (2), sélectionnez la Team qui vous est assignée, cliquez sur Share (3), puis Close (4).

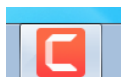




Fin de l'enregistrement sur Camtasia

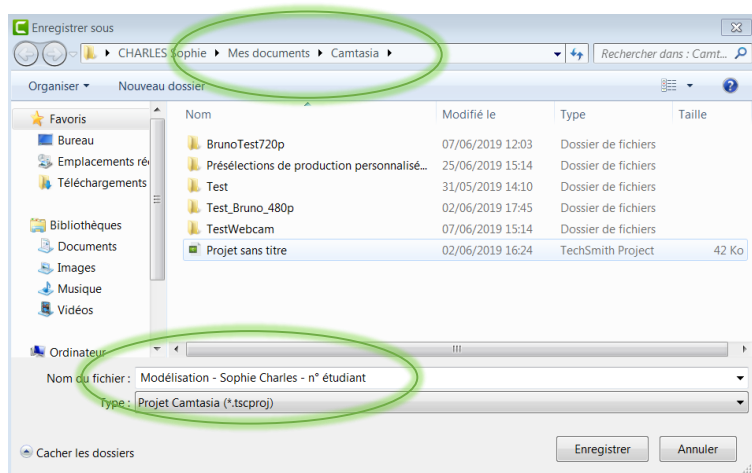


1. Double-cliquez sur l'icône Camtasia ROUGE.

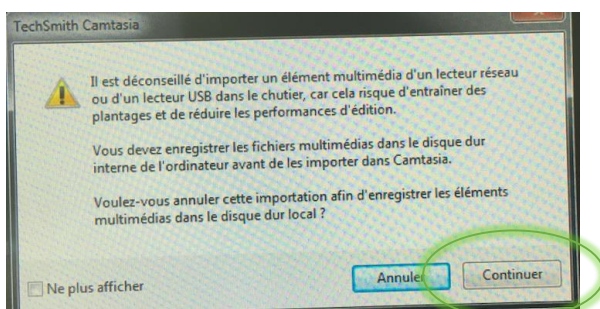


2. Cliquer sur Arrêter.

3. Dans le menu Fichier, sélectionnez Enregistrer. Nommez votre fichier Modélisation – Prénom NOM – N° d'étudiant. Vérifiez que vous êtes bien dans le dossier Camtasia dans Mes documents et enregistrez.



4. Enregistrez à nouveau votre fichier dans le fichier sur le dossier Ordinateur, Répertoire TP, dossier Modélisation. Cliquez sur Continuer lorsque le message d'alerte apparaît.



5. Enregistrez à nouveau votre fichier dans le fichier sur le dossier Ordinateur, dossier Disque amovible. Cliquez sur Continuer lorsque le message d'alerte apparaît.

Annexe 11. Questionnaires Loisirs

Questionnaire Loisirs pratiqués dans l'enfance et à l'adolescence

Indiquez SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE la fréquence à laquelle vous pratiquiez vos loisirs, au moment où vous les pratiquiez, lorsque vous étiez enfant et/ou adolescent selon le code suivant :

Jamais	Quelques fois par an	Tous les mois	Toutes les semaines	Tous les jours
--------	-------------------------	---------------	------------------------	----------------

1. Je faisais de la peinture.
2. Je dessinais.
3. Je jouais avec des perles à repasser.
4. Je jouais avec de la pâte Fimo.
5. J'écrivais des histoires, des poèmes, un journal.
6. Je faisais de la musique.
7. Je chantais.
8. Je jouais aux petites voitures, au petit train.
9. Je jouais aux Lego.
10. Je faisais des puzzles.
11. Je jouais aux Meccano.
12. Je jouais à Minecraft.
13. Je jouais à des jeux vidéo d'action en 3D.
14. Je lisais.
15. Je faisais du vélo, de la trottinette.
16. Je jouais à des jeux de ballon collectifs (e.g. foot, rugby, volley-ball, basket-ball, handball).
17. Je faisais de la danse.
18. Je faisais du tennis ou du ping-pong.
19. Je faisais de la natation.
20. Je faisais de l'escalade.
21. Je jouais au Rubik's cube.
22. Je faisais de l'athlétisme.
23. Je jouais aux échecs.
24. Je pratiquais la lecture de cartes (course d'orientation, voile).

Questionnaire Loisirs actuels

Indiquez SUR LA FEUILLE DE RÉPONSE la fréquence à laquelle vous pratiquez vos loisirs, selon le code suivant :

Jamais	Quelques fois par an	Tous les mois	Toutes les semaines	Tous les jours
--------	-------------------------	---------------	------------------------	----------------

25. Je joue à Fortnite.

26. Je fais des puzzles.

27. Je joue à Minecraft.

28. Je joue à des jeux vidéo d'action en 3D.

29. Je fais du tennis ou du ping-pong.

30. Je joue au Rubik's cube.

31. Je fais de la musique.

32. Je dessine.

33. Je fais du vélo, de la trottinette.

34. Je fais de l'escalade.

35. Je joue aux Meccano.

36. Je joue aux Lego.

37. Je lis.

38. Je joue à des jeux de ballon collectifs (e.g. foot, rugby, volley-ball, basket-ball).

39. Je joue aux échecs.

40. J'écris des histoires, des poèmes, un journal.

41. Je chante.

42. Je fais de la danse.

43. Je fais de la natation.

44. Je fais de l'athlétisme.

45. Je cuisine.

46. Je pratique la lecture de cartes (course d'orientation, voile).

47. Indiquez votre prévalence manuelle

Je suis gaucher.	Je suis droitier.	Je suis ambidextre.
------------------	-------------------	---------------------

48. Quels sont les logiciels de modélisation que vous savez utiliser ?

Solidworks	Catia	SktechUp	Aucun	Autre
------------	-------	----------	-------	-------

Annexe 12. Formulaire de consentement

Formulaire de consentement

Je, soussigné(e) _____, déclare accepter, librement, et de façon éclairée, de participer comme sujet à l'étude intitulée : Thèse EXAPP-3D

Sous la direction de Alain Rivière et Alain Jaillet, Nicolas Peyret et Laurent Jeannin.

Promoteurs : Institut Supérieur de Mécanique de Paris et Université de Cergy-Pontoise

Investigateur principal : Sophie Charles, 2e année de thèse

But de l'étude : Observer et expliciter les stratégies adoptées pour résoudre des problèmes portant sur des solides.

Engagement du participant : l'étude va consister à prendre part à des tests, répondre à des questionnaires et réaliser un exercice de modélisation dont la réalisation sera enregistrée (activité à l'écran et partie supérieure du corps) grâce à un logiciel de captation et une webcam.

Engagement de l'investigateur principal : en tant qu'investigateur principal, il s'engage à mener cette recherche selon les dispositions éthiques et déontologiques, à protéger l'intégrité physique, psychologique et sociale des personnes tout au long de la recherche et à assurer la confidentialité des informations recueillies. Il s'engage également à fournir aux participants tout le soutien permettant d'atténuer les effets négatifs pouvant découler de la participation à cette recherche.

Liberté du participant : le consentement pour poursuivre la recherche peut être retiré à tout moment sans donner de raison et sans encourir aucune responsabilité ni conséquence. Les réponses aux questions ont un caractère facultatif et le défaut de réponse n'aura aucune conséquence pour le sujet.

Information du participant : le participant a la possibilité d'obtenir des informations supplémentaires concernant cette étude auprès de l'investigateur principal, et ce dans les limites des contraintes du plan de recherche.

Confidentialité des informations : Les informations recueillies seront conservées pendant 2 ans et sont destinées à la doctorante et à ses encadrants. Conformément à la loi « informatique et libertés » (Loi 2018-493 du 20 juin 2018), vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant et les faire rectifier en contactant le DPO de l'établissement : Clémentine Moutté. La transmission des informations concernant le participant pour l'expertise ou pour la publication scientifique sera anonyme.

Déontologie et éthique : le promoteur et l'investigateur principal s'engagent à préserver absolument la confidentialité et le secret professionnel pour toutes les informations concernant le participant.

Fait à _____, le _____ en 2 exemplaires

Signatures :

Le participant

L'investigateur principal

Annexe 13. Kit d'encodage des verbatim

KIT D'ENCODAGE

Objectif

Mon étude porte sur la mesure de l'habileté spatiale et les stratégies déclarées mobilisées dans des tests spatiaux par des étudiants. Les problèmes présentés dans ces tests doivent être résolus mentalement, les répondants ne peuvent pas utiliser de support physique (e.g. brouillon, espace de réponse) pour représenter leurs idées (e.g. écrire, dessiner). J'ai fait passer 5 tests à 150 étudiants. Après que les étudiants ont passé les tests, je leur ai demandé d'expliquer dans un questionnaire ouvert comment ils avaient résolu les tâches présentées dans ces tests. Pour chaque test, j'ai choisi 3 questions et j'ai demandé aux étudiants de décrire comment ils avaient répondu à chaque question. Je suis entrain d'encoder ces verbatim. Pour cela, j'ai relevé une série d'indicateurs dont je voudrais valider la description.

Liste des indicateurs

Lorsqu'un élément de la réponse ne peut être encodé selon un des indicateurs ci-dessous, indiquez le code **NI**.

Indicateurs Manipulation mentale d'une partie ou de la totalité d'un objet

Code	Indicateur	Définition	Exemple
MR	Rotation mentale	Action de manipulation de la totalité (Indicateur de mouvement : tourner, pivoter, basculer, rotation, déplacer, superposer, coller, rapprocher, faire tomber) d'un objet. Le sujet indique parfois l'orientation (Indicateur d'orientation : vers la droite/l'arrière, selon l'axe y, vers moi) et quantifie le mouvement (Indicateur de quantité : de 90°, de $\pi/2$, 2 fois).	"J'ai déplacé la forme", "J'ai fait pivoter l'objet demandé de $\pi/2$ ", "J'ai fait tourner l'objet vers moi", "J'ai vu 2 rotations de l'exemple : une de 90° et une de 180°".
MT	Transformation mentale	Transformation ou modification d'une partie (Indicateur de transformation partielle : couper, séparer, sectionner).	"j'ai coupé l'objet", "J'ai séparé la forme A en deux", "J'ai imaginé la coupe de la forme demandée".

Indicateurs Changement de point de vue

Code	Indicateur	Définition	Exemple
PVO	Orientation du point de vue	Le répondant indique le point de vue qu'il adopte pour observer l'objet ou un de ses éléments.	"l'objet est vu de haut", "vue de dessous/derrière".
PVOC	Orientation du point de vue	Orientation du point de vue avec le corps pour observer l'objet ou un de ses éléments	"je suis sous la pièce", "je me suis placé", "on se trouve en bas", "je me suis imaginé tourner autour de la pièce", "À partir du point noir je vois/on voit";

Indicateurs Savoir théorique

Code	Indicateur	Définition	Exemple
RM	Savoir théorique	Référence à une règle mathématique/physique	"Quand on coupe un cylindre avec un plan oblique on obtient une ellipse"
M	Savoir théorique	Utilisation d'un positionnement en miroir/inversé pour déduire la position d'un objet ou d'un élément	"Comme il est à l'envers, je sais que ce qui est à gauche sera à droite"

Indicateurs Savoir expérientiel

Code	Indicateur	Définition	Exemple
SV	Savoir expérientiel vie courante	Référence à une expérience vécue.	“Comme quand on coupe du pain”, “Je tourne comme un Rubik’s cube”, “Comme dans Solidworks”.

Indicateurs Suivre une ligne

Code	Indicateur	Définition	Exemple
CH	Navigation spatiale	Description d’un chemin suivi par le répondant dans/sur une forme	“J’imaginai un chemin (ici : bas, tout droit, droite, tout droit)”.
DS	Dessin	Le répondant imagine dessiner.	“Je dessine la forme”. “Je trace le losange”.
II	Transformation mentale	Description du contour d’une section imaginée ou identification d’intersections entre un plan de coupe et un objet	“j’ai imaginé faire le tour de la coupe”, “je trace mentalement le contour de la coupe”.

Indicateurs Recherche d’une forme/d’un élément 2D dans une forme 2D

Code	Indicateur	Définition	Exemple
FV	Fouille visuelle	Recherche d’une forme complète intriquée dans un motif	“j’ai cherché la forme”, “J’ai cherché un losange”, “J’ai cherché un carré”.

Indicateurs Brique de raisonnement


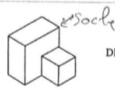
Code	Indicateur	Définition	Exemple
S	Stratégie analytique	Sélection d’une ou de plusieurs réponses en éliminant les réponses jugées incorrectes pour trouver la réponse.	“J’ai procédé par élimination en observant les extrémités “, “J’ai fait tourner la forme mentalement pour trouver la 1ère proposition. À partir de celle-ci j’ai éliminé 2 autres réponses.”
D	Déduction	Déduction d’un résultat attendu.	“Je conclus, on en déduit, il est évident, Je vois”, “On obtient”, “on va voir”, J’imagine ce que j’obtiens.
SR	Absence de réponse	Le sujet n’a pas répondu dans la case dédiée ou a indiqué qu’il ne donnait pas de réponse.	Case vide, “Je ne sais pas”, “Je n’ai pas trouvé la réponse”, “Je n’avais pas de méthode particulière”.
MIM	Mimétisme	Le répondant applique la même stratégie que celle donnée dans les instructions, ou que celle qu’il a utilisée pour un autre objet dans la même réponse .	“Comme dans l’exemple”, “Je retourne l’objet de ‘exemple, puis j’effectue le même protocole pour la question”, “d’après la proposition”.

MEM O	Mémorisation	Mémorisation d'une forme d'un mouvement, d'une procédure.	"Je mémorise", "Je copie mentalement"
DIF	SEP	Difficulté à réaliser une tâche	"J'ai eu du mal avec cet exercice; "C'est trop long", "La rotation est complexe", "je ne suis pas sûr", "je n'ai pas trouvé de stratégie efficace".
REP	Réponse	Le sujet indique/entoure/coche la réponse.	"C'est la A", la réponse est entourée
RI	Réponse identique	Le sujet indique qu'il a répondu à la question en utilisant le même procédé que dans la question précédente.	"Je procède de la même manière", "idem", "de même", "même réponse".
V	Vérification	Vérification du résultat obtenu à l'aide d'une autre stratégie, par une autre méthode.	"Je fais tourner la pièce puis je vérifie avec l'orientation des coudes".
S2	Stratégie de replis	Stratégie de replis quand la première n'a pas fonctionné.	Quand la méthode ne fonctionne pas, je...
FT	Réponse globale	Description de plusieurs stratégies applicables aux questions d'un même test que le répondant choisit en fonction de la question	En fonction de la question, je choisis une stratégie. Pour d'autres questions dans le test, j'ai plutôt utilisé la stratégie suivante.
SEQ	Séquencement	Séquencement indiqué par des marqueurs de mise en page, par des marqueurs de temps. Parfois, il existe une séquence d'actions mais on ne sait pas dans quel ordre ont eu lieu les actions	liste numérotée, puces, "puis", "ensuite", "après", "Je prends la figure et je la fais tourner. Je compte les cubes".
COR	Correspondance	Le répondant compare la réponse qu'il imagine être la bonne avec les choix qui lui sont proposés.	"Je compare avec les propositions"; "Je cherche dans les propositions ce que j'ai imaginé".

Indicateurs Isolement d'un élément d'un objet

Code	Indicateur	Définition	Exemple
ESE	Stratégie analytique	Élément spécifique d'un objet/d'une forme utilisé pour comparer deux objets/forme qui n'est pas manipulé, utilisé pour changer de point de vue ou qui n'indique pas que le répondant a reconnu un même élément représenté de deux manières différentes.	"l'arrête", "le coude", "le virage", "la fin/le début (de la forme)", dessin du répondant décrivant l'élément, "l'orientation des extrémités", "hauteur", "petit", "plus long que", "je compte", dimensions, "le nombre de cubes".
A	Abstraction	Le sujet fait abstraction d'une partie de la forme.	Je fais abstraction; J'ai cherché à éliminer les arcs de cercle.
PA	Point d'ancrage	Référence à un élément spécifique (et parfois sa position sur l'objet) pour manipuler mentalement l'objet ou changer de point de vue, oui qui indique que le répondant a reconnu un même élément représenté de deux manières différentes.	"J'ai mis un point de repère pour faire tourner la figure". Je réfléchis, en faisant tourner l'objet dans ma tête, à l'orientation des décrochés.

Indicateurs Information graphique

Code	Indicateur	Définition	Exemple
DL	Dessin	Le répondant représente une partie de ses explications par un dessin 2D ou 3D dans le cadre noir destiné aux réponses.	
AI	Ajout d'information graphique	Annotation (dessin et/ou texte) de l'intitulé pour ajouter des informations	

Indicateur Construction mentale 3D

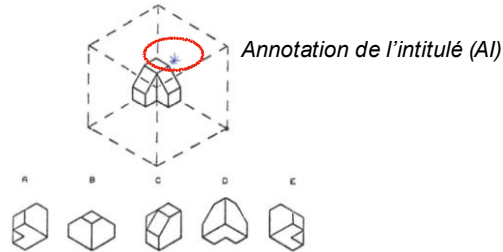
Code	Indicateur	Définition	Exemple
C	Construction 3D	Construction mentale d'un objet 3D	Je construis l'objet dans ma tête, J'ai imaginé l'objet dans ma tête; J'ai regardé la profondeur du modèle pour imaginer par où passait la section.

Exemple d'encodage

Question PSVT1

À quoi ressemble l'objet flottant au milieu du "cube de verre" lorsqu'il est observé à partir du point noir ?

Réponse de l'étudiant :



Pour moi, j'essaie de visualiser l'objet au fond du cube. Ensuite, je "tourne mentalement" le cube
Construction mentale du stimulus à partir de la vue présentée (C) *(SEQ)* *Rotation mentale (MR)*
 de verre de façon à placer le point noir devant moi. J'essaie également de visualiser la face de l'objet
Orientation du point de vue (PVO)

sur la face arrière droite du cube flottant*.

L'encodage relevé est à reporter dans un fichier excel. Ce tableau présente le nom de l'encodeur et dans la rangée supérieure les n° de page des questions des tests.

Dans le tableau, on reporte dans la colonne PSVT1 : AI C SEQ MR PVO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Encodeur	99	99 BIS	100	100 BIS	104	111	112	112 BIS	116	116 BIS	116 TER	122	123	124	
2	Sophie	AI C SEQ MR PVO														
3																

! Une même portion de réponse peut avoir plusieurs encodages.

Exemple : Pour le verbatim



on encode : MR DL MR DL SEQ.

Tableau A1 – Table de fréquence des stratégies identifiées dans le R PSVT:R1 à partir de l’encodage des verbatim Stratégies

Combinaison	Code	R PSVT:R1 Réponse 1		R PSVT:R1 Réponse 2		R PSVT:R1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et NI	N/A	2	1	2	1	4	3
MR	2	116	79	104	71	96	66
MRPA	3	19	13	31	21	32	22
MRPAPVO	4	2	1	1	1	2	1
MRPVO	5	1	1	3	2	5	3
MRPVOC	6	1	1	0	0	0	0
MRS2COR	7	1	1	0	0	0	0
MRSV	8	2	1	1	1	0	0
PVO	9	1	1	3	2	6	4
PVOC	10	1	1	1	1	1	1
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. *n* = nombre d’étudiants par catégorie ; % = pourcentage d’étudiants par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les réponses des trois questions du R PSVT:R1 sélectionnées.

Neuf stratégies différentes ont été relevées. Les combinaisons les plus mobilisées sont la rotation mentale et la rotation mentale à l’aide d’un point de repère.

Tableau A2 – Table de fréquence des stratégies identifiées dans le MRT1 à partir de l’encodage des verbatim Stratégies

Combinaison	Code	MRT1 Réponse 1		MRT1 Réponse 2		MRT1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et NI	N/A	6	4	7	5	9	6
CH	2	10	7	7	5	10	7
CHESE	3	0	0	0	0	1	1
ESE	4	20	14	44	30	21	14
M	5	1	1	1	1	1	1
MMR	6	2	1	2	1	2	1
MR	7	82	56	60	41	74	51
MRCH	8	3	2	3	2	4	3
MRESE	9	5	3	6	4	5	3
MRPA	10	8	5	8	5	10	7
MRPAA	11	0	0	0	0	1	1
MRPAESE	12	0	0	1	1	0	0
MRPASV	13	0	0	0	0	1	1
MRSV	14	1	1	1	1	1	1
MRSVESE	15	1	1	1	1	1	1
PVOC	16	5	3	3	2	3	2
PVOESE	17	1	1	1	1	1	1
PVOPA	18	1	1	1	1	1	1
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. *n* = nombre d’étudiants par catégorie ; % = pourcentage d’étudiants par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les réponses des trois questions du MRT1 sélectionnées.

Dix-sept stratégies différentes ont été relevées. Les combinaisons les plus mobilisées sont la rotation mentale et l’identification d’un point de comparaison.

Tableau A3 – Table de fréquence des stratégies identifiées dans le MCT1 à partir de l’encodage des verbatim Stratégies

Combinaison	Code	MCT1 Réponse 1		MCT1 Réponse 2		MCT1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et NI	N/A	4	3	15	10	15	10
ESE	2	6	4	34	23	32	22
FT	3	0	0	0	0	0	0
II	4	18	12	22	15	14	10
IEESE	5	0	0	7	5	2	1
IIPA	6	0	0	2	1	1	1
IIRM	7	2	1	0	0	0	0
MR	8	1	1	1	1	1	1
MRESE	9	0	0	1	1	1	1
MRIESE	10	0	0	0	0	1	1
MT	11	65	45	27	18	41	28
MTA	12	0	0	1	1	1	1
MTESE	13	0	0	6	4	3	2
MTESESV	14	1	1	0	0	0	0
MTII	15	1	1	2	1	2	1
MTIEESE	16	1	1	0	0	0	0
MTPA	17	8	5	19	13	21	14
MTPARM	18	1	1	0	0	0	0
MTPASV	19	0	0	2	1	1	1
MTPVOC	20	3	2	3	2	4	3
MTPVOCII	21	1	1	0	0	0	0
MTRM	22	2	1	0	0	0	0
MTSV	23	12	8	2	1	3	2
MTSVPVOC	24	1	1	1	1	1	1
PVO	25	1	1	0	0	0	0
PVOC	26	1	1	1	1	1	1
PVOCII	27	1	1	0	0	0	0
RM	28	13	9	0	0	1	1
RMSV	29	1	1	0	0	0	0
SV	30	2	1	0	0	0	0
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. *n* = nombre d’étudiants par catégorie ; % = pourcentage d’étudiants par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les réponses des trois questions du MCT1 sélectionnées.

Vingt-neuf stratégies différentes ont été relevées. Les combinaisons les plus mobilisées sont la transformation mentale et la transformation mentale à l’aide d’un point de repère.

Tableau A4 – Table de fréquence des stratégies identifiées dans le CFT1 à partir de l’encodage des verbatim Stratégies

Combinaison	Code	MCT1 Réponse 1		MCT1 Réponse 2		MCT1 Réponse 3	
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
FT et NI	N/A	4	3	2	4	9	6
A	2	1	1	0	0	0	0
AESE	3	1	1	1	1	0	0
CHESE	4	1	1	1	1	1	1
DS	5	16	11	14	10	17	12
DSESE	6	2	1	1	1	1	1
ESE	7	18	12	15	10	21	14
FV	8	47	32	47	32	40	27
FVA	9	3	2	3	2	2	1
FVAESE	10	1	1	1	1	1	1
FVDS	11	1	1	1	1	2	1
FVESE	12	20	14	25	17	22	15
FVESEDS	13	0	0	0	0	3	2
FVMR	14	0	0	2	1	1	1
MR	15	25	17	20	14	17	12
MRA	16	1	1	0	0	0	0
MRDS	17	1	1	1	1	1	1
MRESE	18	4	3	6	4	6	4
MRESEDS	19	0	0	1	1	1	1
PVOMR	20	0	0	0	0	1	1
Total		146	100	146	100	146	100

Légende. *n* = nombre d’étudiants par catégorie ; % = pourcentage d’étudiants par catégorie.

Ce tableau décrit la fréquence des combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les réponses des trois questions du CFT1 sélectionnées.

Dix-neuf stratégies différentes ont été relevées. Les combinaisons les plus mobilisées sont la recherche d’un élément intriqué dans un motif complexe, la comparaison à partir d’un élément saillant et la rotation mentale.

Tableau A5 – Grille d’encodage du QCM Stratégies R PSVT:R

Proposition	Stratégie de résolution	Code
1	Rotation mentale	RM
2	Un tout réorganisé	RM
3	Stratégie analytique	SA
4	Autre	AU

Ce tableau décrit la stratégie et le code affecté à chacune des réponses proposées pour le R PSVT:R.

Tableau A6 – Grille d’encodage du QCM Stratégies MRT

Proposition	Stratégie de résolution	Code
1	Rotation mentale	RM
2	Stratégie analytique	SA
3	Stratégie analytique	SA
4	Autre	AU

Ce tableau décrit la stratégie et le code affecté à chacune des réponses proposées pour le MRT.

Tableau A7 – Grille d’encodage du QCM Stratégies MCT

Proposition	Stratégie de résolution	Code
1	Transformation mentale	TM
2	Transformation mentale	TM
3	Stratégie analytique - Mesures	SB
4	Autre	AU

Ce tableau décrit la stratégie et le code affecté à chacune des réponses proposées pour le MCT.

Tableau A8 – Grille d’encodage du QCM Stratégies CFT

Proposition	Stratégie de résolution	Code
1	Dissociation	FV
2	Rotation mentale	RM
3	Autre	AU

Ce tableau décrit la stratégie et le code affecté à chacune des réponses proposées pour le CFT.

Tableau A9 – Affectation d’un indice aux catégories de la dimension manipulatoire

MR		MV		PM	
Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs
MR0	0	MV0	0	PM0	0
MR1	1-6	MV1	1	PM1	1-2
MR2	7-13	MV2	2	PM2	3-5

Ce tableau décrit le code affecté aux catégories de la dimension manipulatoire en fonction du nombre de loisirs pratiqués dans cette catégorie.

Tableau A10 – Affectation d’un indice aux catégories de la dimension 2D

2D		P2D	
Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs
2D0	0	P2D0	0
2D1	1-2	P2D1	1-7
2D2	3-5	P2D2	8-14

Ce tableau décrit le code affecté aux catégories de la dimension 2D en fonction du nombre de loisirs pratiqués dans cette catégorie.

Tableau A11 – Affectation d'un indice aux catégories de la dimension construction 3D

C3D		PC3D	
Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs
C3D20	0	PC3D20	0
C3D21	1	PC3D21	1-7
C3D22	2-3	PC3D22	8-16

Ce tableau décrit le code affecté aux catégories de la dimension construction 3D en fonction du nombre de loisirs pratiqués dans cette catégorie.

Tableau A12 – Affectation d'un indice aux catégories de la dimension artistique

DEPP		PDEP	
Code	Nombre de loisirs	Code	Nombre de loisirs
ART0	0	PART0	0
ART1	1-2	PART1	1-7
ART2	3-5	PART2	8-13

Ce tableau décrit le code affecté aux catégories de la dimension artistique en fonction du nombre de loisirs pratiqués dans cette catégorie.

Tableau A13 – Combinaison des indices de la dimension manipulateur

MRV	
Indice combiné	Indice réel et virtuel
MRV0A	MR0 + MV0
MRV0B	MR0 + MV1
MRV0C	MR0 + MV2
MRV0D	MV0 + MR1
MRV0E	MV0 + MR2
MRV1A	MR1 + MV1
MRV1B	MR1 + MV2
MRV2A	MR2 + MV1
MRV2B	MR2 + MV2

Ce tableau décrit l'indice combiné affecté aux catégories de la dimension manipulateur après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie.

Tableau A14 – Définitions des indices dimensionnels de la dimension manipulateur

Indice dimensionnel	Définition
MR0A	MRV nul (MR nul, MV nul), PM nul
MR0B	MRV nul (MR nul, MV nul), PM modéré
MR0C	MRV nul (MR nul, MV nul), PM élevé
MR0D	MRV nul (MR nul, MV modéré), PM nul
MR0E	MRV nul (MR nul, MV modéré), PM modéré
MR0F	MRV nul (MR nul, MV modéré), PM nul
MR0G	MRV nul (MR nul, MV fort), PM nul
MR0H	MRV nul (MR nul, MV fort), PM modéré
MR0I	MRV nul (MR nul, MV fort), PM élevé
MR0J	MRV nul (MR modéré, MV nul), PM nul
MR0K	MRV nul (MR modéré, MV nul), PM modéré
MR0L	MRV nul (MR modéré, MV nul), PM fort
MR0M	MRV nul (MR fort, MV nul), PM nul
MR0N	MRV nul (MR fort, MV nul), PM modéré
MR0O	MRV nul (MR fort, MV nul), PM fort
MR1A	MRV modéré (MR modéré, MV modéré), PM nul
MR1B	MRV modéré (MR modéré, MV modéré), PM modéré
MR1C	MRV modéré (MR modéré, MV modéré), PM fort
MR1D	MRV modéré (MR modéré, MV fort), PM nul
MR1E	MRV modéré (MR modéré, MV fort), PM modéré
MR1F	MRV modéré (MR modéré, MV fort), PM fort
MR2A	MRV fort (MR fort, MV modéré), PM nul
MR2B	MRV fort (MR fort, MV modéré), PM modéré
MR2C	MRV fort (MR fort, MV modéré), PM fort
MR2D	MRV fort (MR fort, MV fort), PM nul
MR2E	MRV fort (MR fort, MV fort), PM modéré
MR2F	MRV fort (MR fort, MV fort), PM fort

Ce tableau décrit l'indice dimensionnel affecté aux catégories de la dimension manipulateur après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie et les indices d'absence de pratique.

Tableau A15 – Combinaison des indices de la dimension 2D

2D	
Indice combiné	Indice réel et virtuel
2D0A	2D0 + P2D0
2D0B	2D0 + P2D1
2D0C	2D0 + P2D2
2D1A	2D1 + P2D0
2D2A	2D2 + P2D0
2D1B	2D1 + P2D1
2D1C	2D1 + P2D2
2D2B	2D2 + P2D1
2D2C	2D2 + P2D2

Ce tableau décrit l'indice combiné affecté aux catégories de la dimension 2D après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie.

Tableau A16 – Combinaison des indices de la dimension construction 3D

C3D	
Indice combiné	Indice réel et virtuel
C3D0A	C3D0 + PC3D0
C3D0B	C3D0 + PC3D1
C3D0C	C3D0 + PC3D2
C3D1A	C3D1 + PC3D0
C3D2A	C3D2 + PC3D0
C3D1B	C3D1 + PC3D1
C3D1C	C3D1 + PC3D2
C3D2B	C3D2 + PC3D1
C3D2C	C3D2 + PC3D2

Ce tableau décrit l'indice combiné affecté aux catégories de la dimension construction 3D après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie.

Tableau A17 – Combinaison des indices de la dimension artistique

ART	
Indice combiné	Indice réel et virtuel
ART0A	ART0 + PART0
ART0B	ART0 + PART1
ART0C	ART0 + PART2
ART1A	ART1 + PART0
ART2A	ART2 + PART0
ART1B	ART1 + PART1
ART1C	ART1 + PART2
ART2B	ART2 + PART1
ART2C	ART2 + PART2

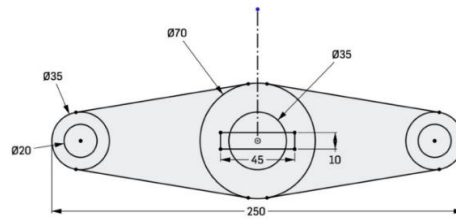
Ce tableau décrit l'indice combiné affecté aux catégories de la dimension artistique après avoir combiné les indices de pratique réelle et virtuelle d'une catégorie.

Annexe 14. Kit d'encodage Onshape

KIT D'ENCODAGE ONSHAPE


Objectif

Mon étude porte sur les stratégies mobilisées dans des modélisations 3D sur la plate-forme de modélisation Onshape par des étudiants. Les étudiants ont suivi un tutoriel de prise en main, puis je leur ai demandé de modéliser une pièce à partir d'une représentation 3D cotée. J'ai enregistré leur activité à l'écran à l'aide du logiciel de captation Camtasia et j'ai filmé la partie supérieure de leur corps à l'aide d'une webcam. Je suis entrain d'encoder ces vidéos synchrones. Pour cela, j'ai relevé une série d'indicateurs dont je voudrais valider la description.



Liste des indicateurs

Indicateurs Clavier

Code	Indicateur	Définition	Exemple
Cote	Contrainte explicite dimensionnelle	Dimension entrée dans la case prévue à cet effet.	
ESC	Désactivation d'une fonction.	Touche Echap	Action invisible à l'écran, parfois visible à la webcam, parfois entendue.
Entrée	Validation d'une dimension.	Touche Entrée	Action invisible à l'écran, parfois visible à la webcam, parfois entendue.

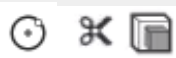

Indicateurs Déplacement de la souris

Code	Indicateur	Définition	Exemple
DT	Déplacement souris sans finalité	Le sujet déplace le pointeur de la souris à l'écran sans avoir de direction précise.	Navigation zigzagante ou lente sur l'écran, parfois avec apparition de petites fenêtres.
DTM	Recherche d'une fonction	Le sujet déplace le pointeur dans un menu à la recherche d'une fonction.	Navigation zigzagante dans un menu, parfois avec apparition de petites fenêtres.
DE	Déplacement élément	À l'aide de la souris, le sujet déplace un élément du dessin.	Mouvement d'un élément de l'objet à l'écran.
PS	Pivot souris	Le sujet fait pivoter l'ensemble de la figure à l'aide de la souris pour la visualiser en 3D.	Mouvement de la totalité de l'objet à l'écran.
P	Pointe	Le sujet pointe le curseur sur un élément du dessin, sur une icône dans le menu.	Curseur immobile sur un élément du dessin, sur une icône du menu. Des affichages de contraintes, des petites fenêtres peuvent apparaître.

Indicateurs Production d'un élément du profil à l'aide de la souris : dessin

Code	Indicateur	Définition	Exemple
CPD	Production d'un élément du profil : dessin	<p>Le sujet clique</p> <ul style="list-style-type: none"> -sur une position dans le repère où il veut créer un élément, -sur un élément du profil auquel il veut appliquer une fonction, -sur un élément du profil auquel il veut attribuer une dimension. <p>Il/elle agit directement sur le dessin.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -un point dans le repère, -un segment, un cercle, -une zone d'attribution de la dimension d'un objet (rayon, diamètre, largeur, longueur), zone d'attribution de la distance entre 2 points.

Indicateur Production d'un élément du profil à l'aide de la souris : autre

Code	Indicateur	Définition	Exemples
CL	Choix d'une fonction à l'aide de la souris	Le sujet clique sur une fonction du logiciel.	 Sketch
CPA	Production d'un élément du profil : autre	<p>Le sujet clique</p> <ul style="list-style-type: none"> -sur une icône de validation ou de suppression, -sur une zone (plan, face d'un profil) pour lui attribuer une fonction préalablement sélectionnée (dans l'exemple à droite : la zone Front plane a été attribuée au Sketch plane du Sketch 4 en cliquant sur le plan de face dans le repère). <p>Il/elle n'agit pas directement sur le dessin.</p>	 <p>Sketch 4</p> <p>Sketch plane</p> <p>Front plane</p>

Indicateurs Réponse du logiciel

Code	Indicateur	Définition	Exemples
ME	Message d'erreur	Le logiciel indique au sujet que sa dernière action est incompatible avec les règles de modélisation.	Message en rouge : "Sketch could not be solved". Les icônes des contraintes incompatibles et les éléments du profil concernés apparaissent en rouge.
A	Affichage d'un résultat	Le logiciel affiche le résultat de l'action du sujet sur le dessin.	Un cercle bleu vif apparaît, une dimension apparaît en noir, un cercle et un segment deviennent tangents.

Indicateurs Regard à partir de la vidéo de la webcam

Code	Indicateur	Définition	Exemple
Ecran	Regard écran	Le sujet regarde l'écran pendant l'exercice.	Regard face à soi (reflet dans les lunettes).
Instructions	Regard instructions	Le sujet regarde les instructions pendant l'exercice.	Regard vers la table.
Clavier	Regard clavier	Le sujet regarde le clavier pendant l'exercice.	Regard vers le clavier.
Voisin (e)	Regard voisin	Le sujet regarde son voisin pendant l'exercice.	Regard vers la personne assise à côté, regard vers l'écran de la personne assise à côté.

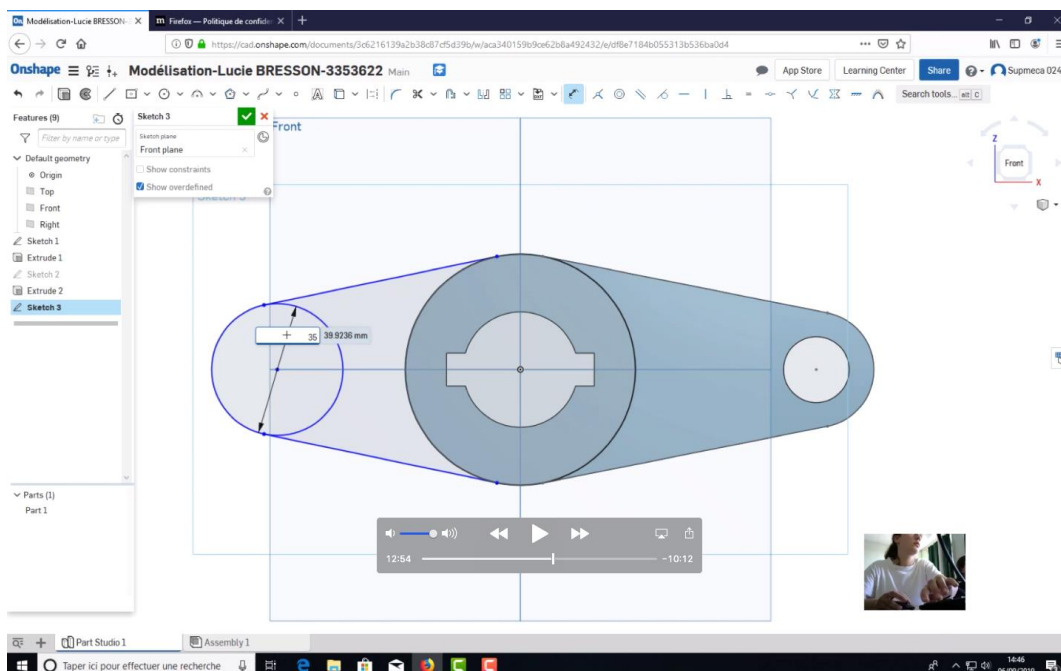
Indicateurs Tête

Code	Indicateur	Définition
Hoche	Assentiment	Le sujet secoue la tête de bas en haut.
Secoue	Désaccord	Le sujet secoue la tête de droite à gauche.
Grimace	Difficulté	Le sujet grimace ou fronce les sourcils.

Indicateur Verbatim

Code	Indicateur	Définition	Exemple
AIE	Apport information extérieure	Le sujet entend une information qui concerne la modélisation de l'objet à modéliser dans son échange verbal avec un voisin, dans son échange verbal avec la chercheuse, dans un échange verbal entre d'autres sujets, dans un échange verbal entre un autre sujet et la chercheuse.	"S1: Ah, voilà ! S2: Tu l'as fait ? S1: Égale entre les deux traits-là, du coup ça régit la distance."

Exemple d'encodage



Time stamp		Clavier	Souris : déplacement	Souris : production dessin	Souris : production autre	Logiciel : action	Logiciel : réponse	Regard	Tête	Verbatim
Minute	Seconde									
12	54	Cote						Écran		

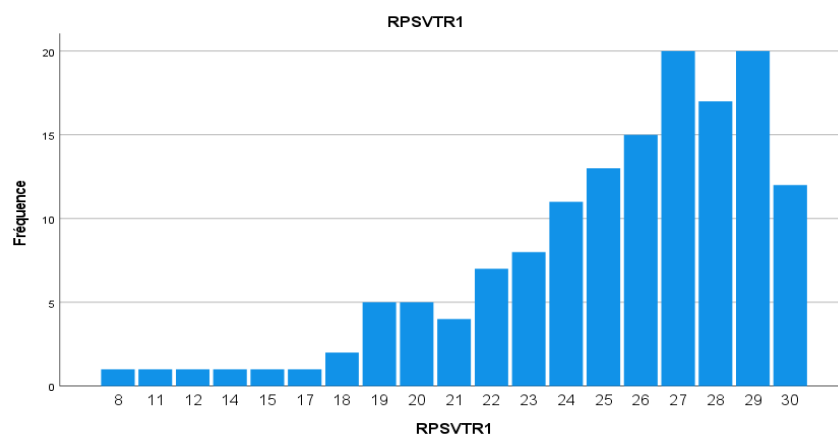
Ci-joint, un tableau excel à imprimer, puis à compléter à la main. Ce tableau présente le défilé du temps dans la colonne de gauche sous l'intitulé Timestamp. Les indicateurs sont répartis en catégories comme présentés ci-dessus. Dans le tableau, pour l'exemple ci-dessus, on écrit à la seconde 54 de la 12e minute : Cote dans la colonne Clavier, et Écran dans la colonne Regard.

Lorsque vous avez complété votre tableau papier avec votre encodage, scannez-le et envoyez-le moi svp.

! Certains indicateurs sont quasi simultanés.

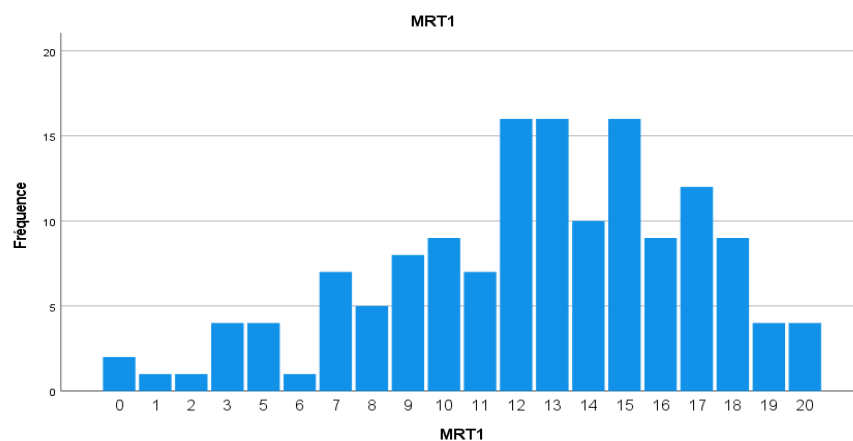
J'effectue un premier passage pour le clavier, la souris et le logiciel, un deuxième pour le regard, la tête et le verbatim. Je fais aussi des retours en arrière lorsque je n'arrive à pas relever en une seule fois plusieurs indicateurs simultanés.

Figure A1 – Distribution des scores du R PSVT:R1



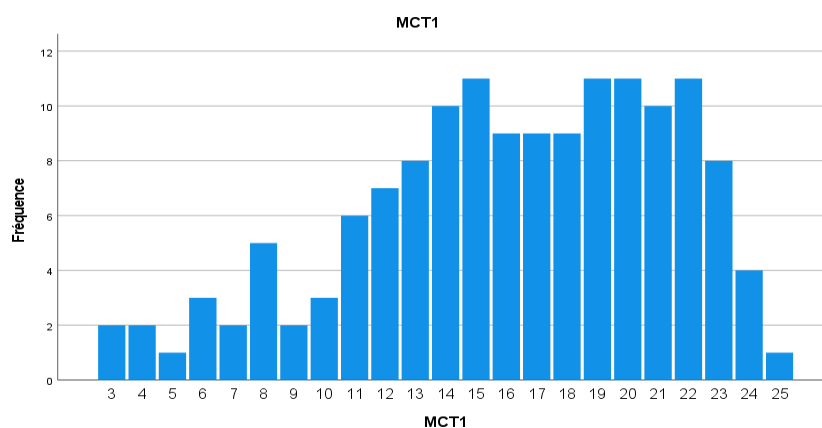
Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, RPSVTR1 = scores obtenus au R PSVT:R au premier recueil.
 Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.
 On observe un étalement important des scores faibles et moyens alors que la distribution des scores entre 24 et 30 semble normale.

Figure A2 – Distribution des scores du MRT1



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, MRT1 = scores obtenus au MRT au premier recueil.
 Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.
 On observe un étalement des scores faibles alors que la distribution des scores entre 8 et 20 semble normale.

Figure A3 – Distribution des scores du MCT1



Légende. Fréquence = nombre d'étudiants, MCT1 = scores obtenus au MCT au premier recueil.
Le graphique décrit le nombre d'étudiants ayant obtenu un score spécifique.
On observe un étalement des scores faibles alors que la distribution des scores entre 9 et 25 semble normale.

Tableau A18 - Récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la filière d'origine

Test	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>p</i>
PSVT:V1	144	2970,5	0,109
R PSVT:R1	146	2798	0,532
MRT1	146	2794	0,544
MCT1	146	2844	0,422

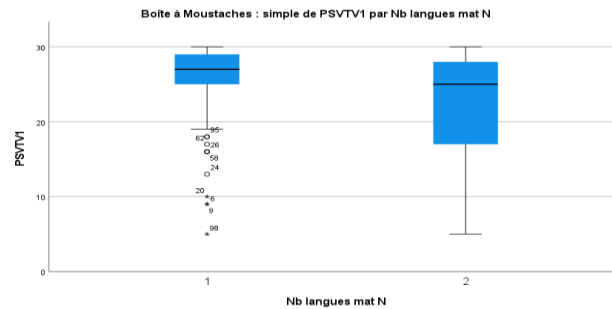
Légende. *N* = nombre d'étudiants, *U* = valeur du résultat du test de Mann-Whitney, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Mann-Whitney pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la filière d'origine et la significativité du résultat.

Tableau A19 – Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la prévalence manuelle

Test	<i>N</i>	$\chi^2(2)$	<i>p</i>
R PSVT:R1	146	1,63	0,443
MRT1	146	1,40	0,498
MCT1	146	4,62	0,099

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, () = degré de liberté, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la prévalence manuelle et la significativité du résultat.

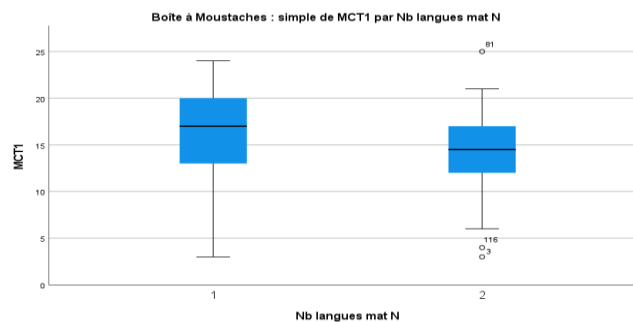
Figure A4 – Distribution du PSVT:V1 selon le nombre de langues maternelles apprises



Légende. 1 = une langue maternelle, 2 = deux langues maternelles ; PSVTV1 = scores du PSVT:V au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V1 des étudiants ayant appris une ou deux langues maternelles. Les scores des étudiants ayant appris une langue maternelle sont plus élevés et plus écartés que ceux qui en ont appris deux.

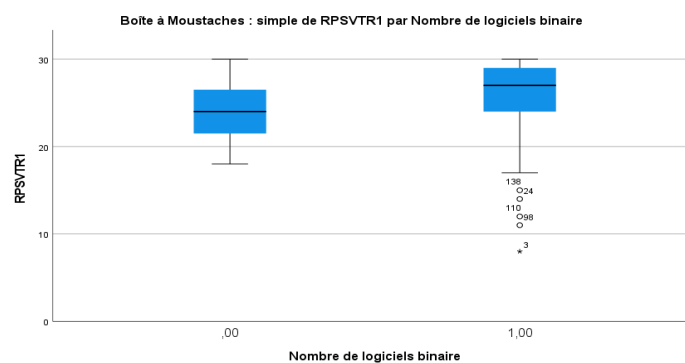
Figure A5 - Distribution du MCT1 selon le nombre de langues maternelles apprises



Légende. 1 = une langue maternelle, 2 = deux langues maternelles ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants ayant appris une ou deux langues maternelles. Les scores des étudiants ayant appris une langue maternelle sont plus élevés et plus écartés que ceux qui en ont appris deux.

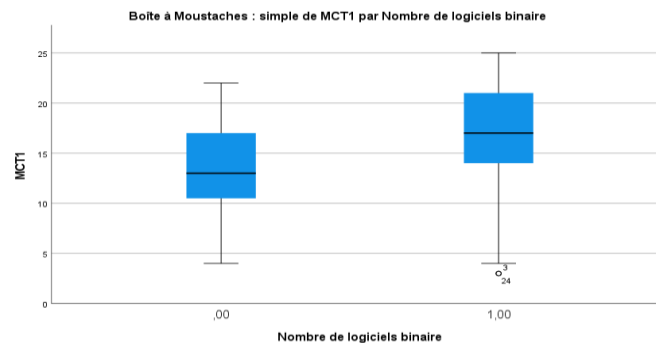
Figure A6 – Distribution du R PSVT:R1 selon la pratique de logiciels



Légende. 0 = pas de pratique de logiciels de modélisation, 1 = pratique de logiciels de modélisation; RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants avec ou sans pratique de logiciels de modélisation. Les étudiants ayant une pratique antérieure des logiciels de modélisation ont des scores plus élevés mais aussi plus écartés.

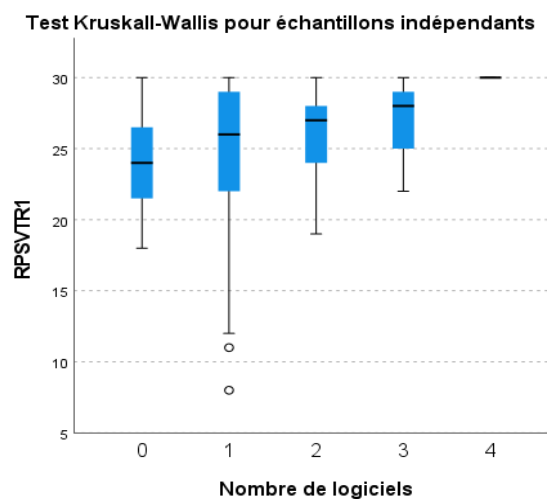
Figure A7 – Distribution du MCT1 selon la pratique de logiciels



Légende. 0 = pas de pratique de logiciels de modélisation, 1 = pratique de logiciels de modélisation ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants avec ou sans pratique de logiciels de modélisation. Les étudiants ayant une pratique antérieure des logiciels de modélisation ont des scores plus élevés mais aussi plus étalés.

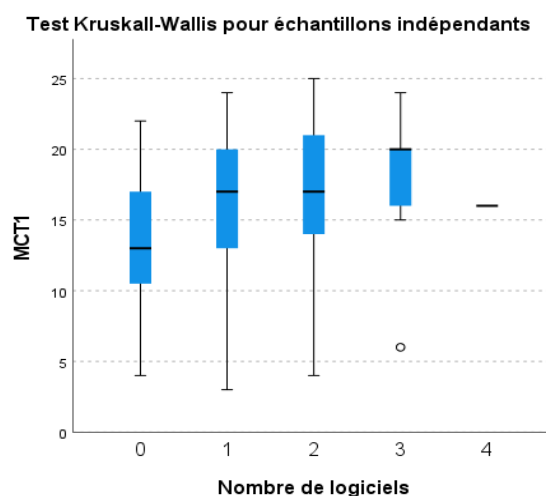
Figure A8 – Distribution du R PSVT:R1 selon le nombre de logiciels pratiqués



Légende. 1 = pratique d'un logiciel, 2 = pratique de deux logiciels, 3 = pratique de trois logiciels, 4 = pratique de quatre logiciels ; RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants selon leur pratique de logiciels de modélisation. La performance au R PSVT:R1 semble croître avec le nombre de logiciels pratiqués.

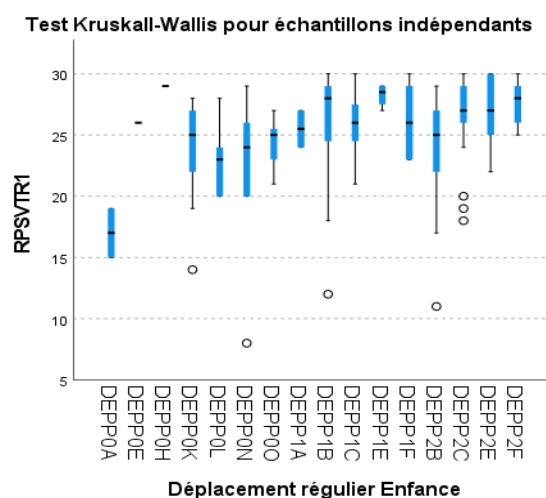
Figure A9 – Distribution du MCT1 selon le nombre de logiciels pratiqués



Légende. 1 = pratique d'un logiciel, 2 = pratique de deux logiciels, 3 = pratique de trois logiciels, 4 = pratique de quatre logiciels ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants selon leur pratique de logiciels de modélisation. La performance au MCT1 semble croître avec le nombre de logiciels pratiqués.

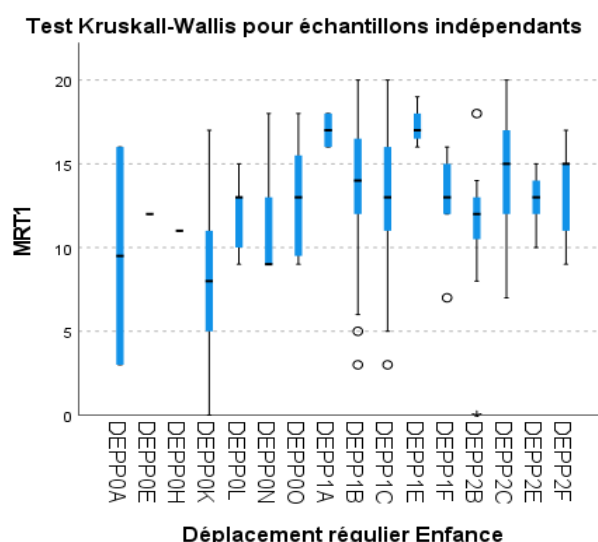
Figure A10 – Distribution du R PSVT:R1 selon les catégories de loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence. La performance au R PSVT:R1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs dynamiques.

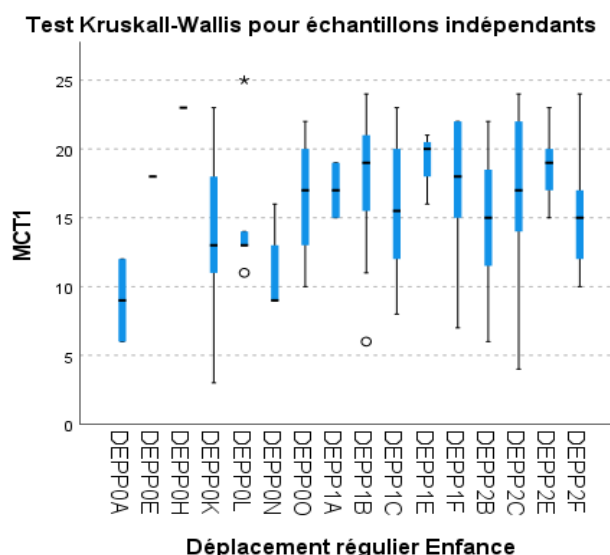
Figure A11 – Distribution du MRT1 selon les catégories de loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; MRT1 = scores du MRT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MRT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence. Les meilleures performances au MRT1 concernent les catégories à pratique de loisirs dynamiques modérée et élevée.

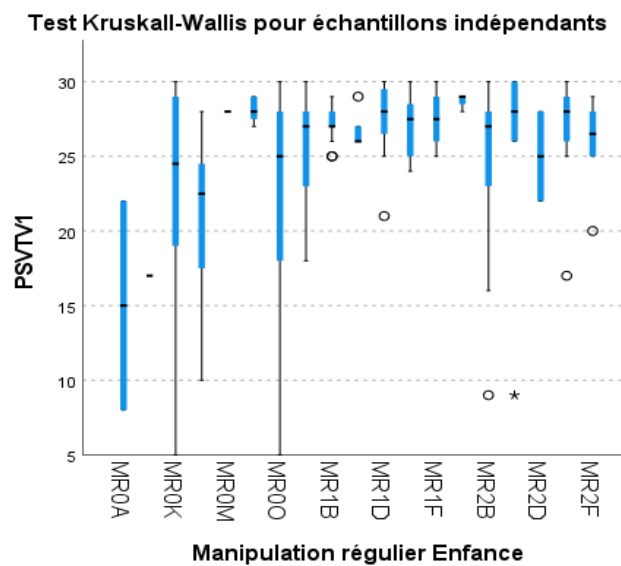
Figure A12 – Distribution du MCT1 selon les catégories de loisirs avec déplacements physiques et/ou virtuels pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence. Les meilleures performances au MCT1 sont réalisées par des étudiants ayant pratiqué un nombre modéré ou élevé de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence.

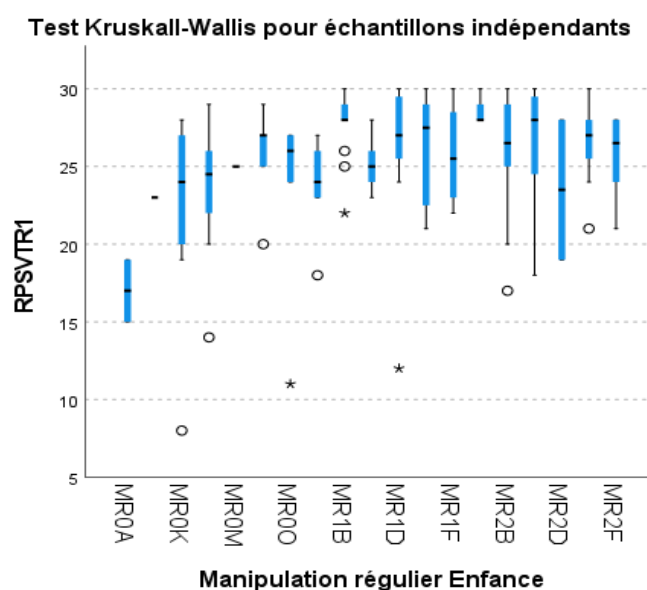
Figure A13 – Distribution du PSVT:V1 selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A14, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; PSVT:V1 = scores du PSVT:V au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V1 des étudiants selon leur pratique de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. La performance au PSVT:V1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs manipulatoires.

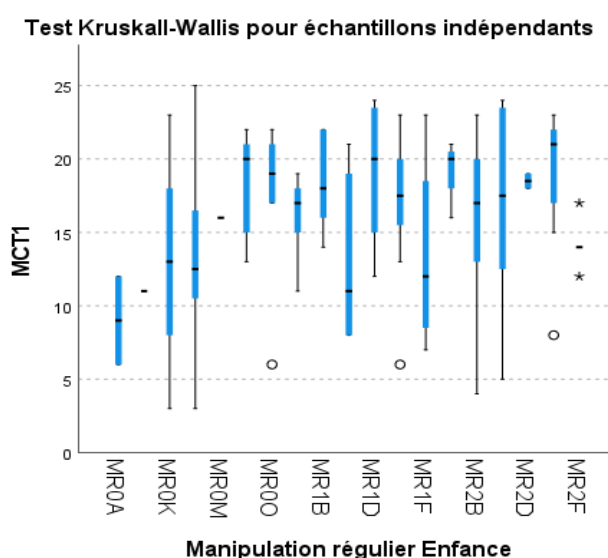
Figure A14 – Distribution du R PSVT:R1 selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A14, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées; RPSVTV1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants selon leur pratique de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. La performance au R PSVT:R1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs manipulatoires.

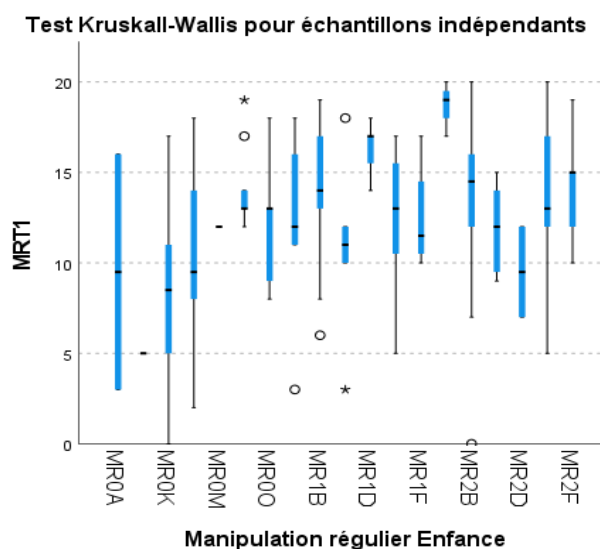
Figure A15 – Distribution du MCT1 selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A14, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. Les meilleures performances au MCT1 sont réalisées par des étudiants ayant pratiqué un nombre modéré ou élevé de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence.

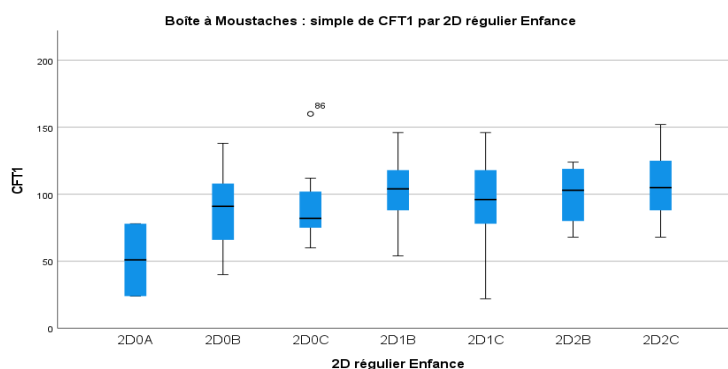
Figure A16 – Distribution du MRT1 selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A14, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées; MRT1 = scores du MRT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MRT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence. Les meilleures performances au MRT1 sont réalisées par des étudiants ayant pratiqué un nombre modéré ou élevé de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence.

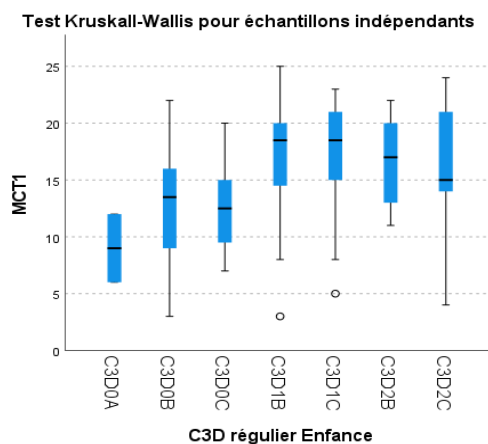
Figure A17 – Distribution du CFT1 selon les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A15, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; CFT1 = scores du CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence. La performance au CFT1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs 2D.

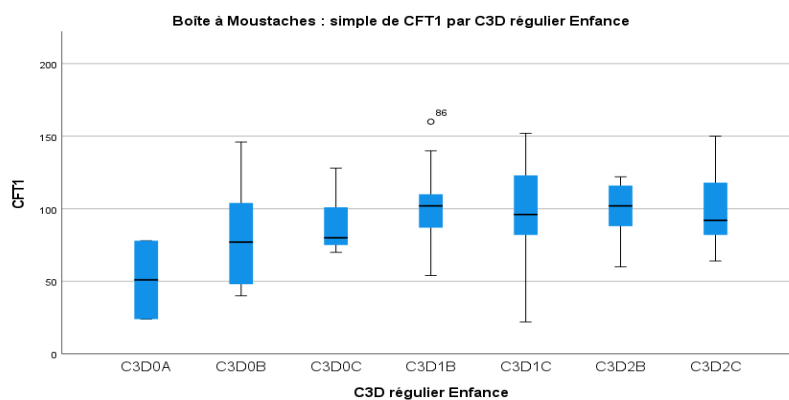
Figure A18 – Distribution du MCT1 selon les loisirs de construction pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A16, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs de construction dans l'enfance et l'adolescence. La performance au MCT1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs C3D.

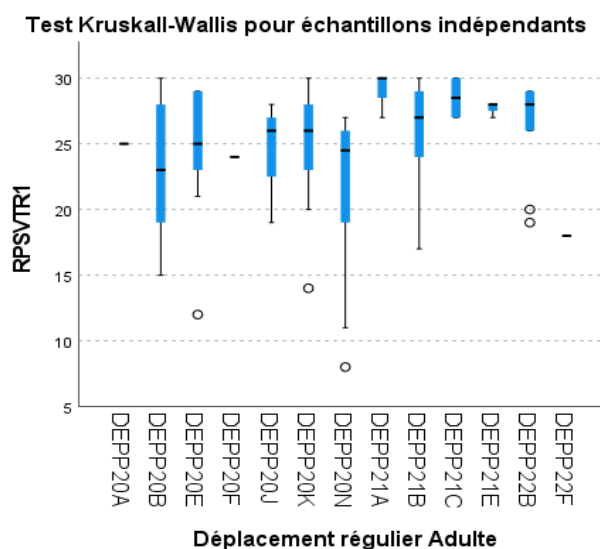
Figure A19 – Distribution du CFT1 selon les catégories de loisirs de construction pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. Se référer au tableau A16, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; CFT1 = scores du CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs de construction dans l'enfance et l'adolescence. La performance au CFT1 des différentes catégories tend à croître avec l'augmentation de la fréquence ces loisirs C3D.

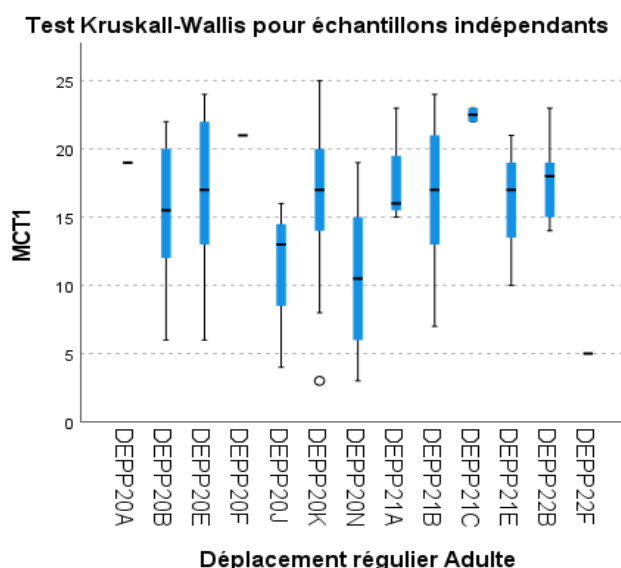
Figure A20 – Distribution du R PSVT:R1 selon les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques à l'âge adulte. Les meilleures performances au R PSVT:R1 sont réalisées par des étudiants ayant pratiqué un nombre modéré ou élevé de loisirs dynamiques à l'âge adulte.

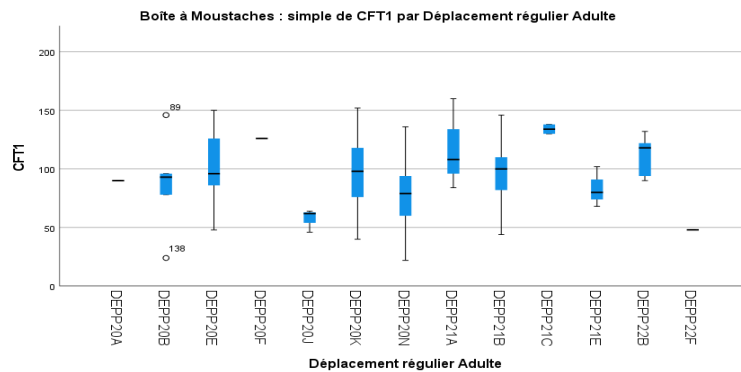
Figure A21 – Distribution du MCT1 selon les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; MCT1 = scores du MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques à l'âge adulte. La performance au MCT1 est relativement homogène quelle que soit la fréquence avec cependant un décrochage pour des catégories de fréquence modérée.

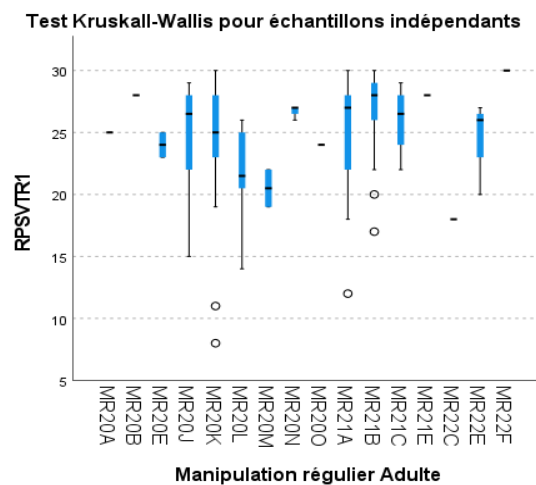
Figure A22 – Distribution du CFT1 selon les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau 24 pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; CFT1 = scores du CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs dynamiques à l'âge adulte. La performance hétérogène au CFT1 selon la fréquence de pratique des loisirs dynamiques à l'âge adulte pourrait expliquer le résultat significatif du test.

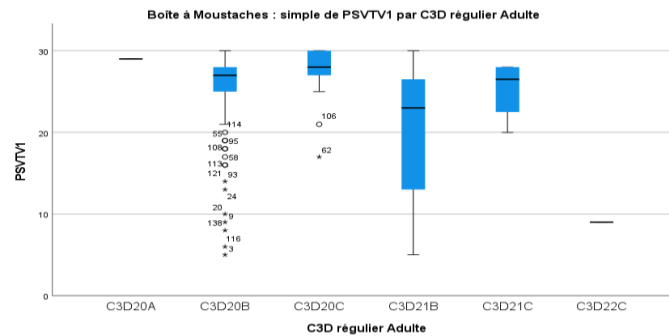
Figure A23 – Distribution du R PSVT:R1 selon les catégories de loisirs manipulateurs pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau A14, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R1 des étudiants selon leur pratique de loisirs manipulateurs à l'âge adulte. La performance hétérogène au R PSVT:R1 selon la fréquence de pratique des loisirs manipulateurs à l'âge adulte pourrait expliquer le résultat significatif du test.

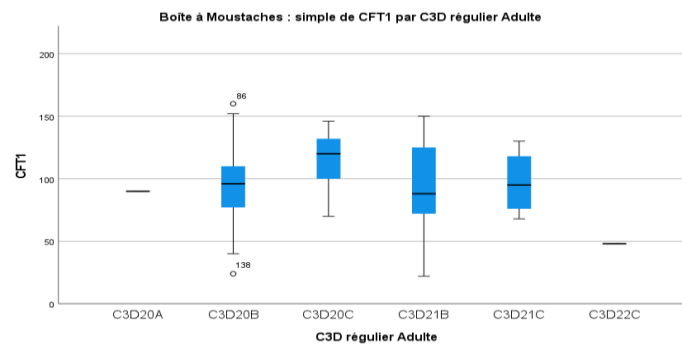
Figure A24 – Distribution du PSVT:V1 selon les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau A16, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; PSVT:V1 = scores du PSVT:V au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V1 des étudiants selon leur pratique de loisirs de construction 3D à l'âge adulte. La catégorie obtenant la meilleure performance, la catégorie C3D20C est caractérisée par un nombre de loisirs non liés à la construction élevé.

Figure A25 – Distribution du CFT1 selon les catégories de loisirs de construction 3D pratiqués à l'âge adulte



Légende. Se référer au tableau A16, en annexe, pour consulter les définitions des catégories mobilisées ; CFT1 = scores du CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des étudiants selon leur pratique de loisirs de construction 3D à l'âge adulte. La catégorie obtenant la meilleure performance, la catégorie C3D20C est caractérisée par un nombre de loisirs non liés à la construction élevé.

Tableau A26 – Table de fréquence du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le R PSVT:R1, MRT1, MCT1 et CFT1 dans les verbatim Stratégies

	R PSVT:R1		MRT1		MCT1		CFT1	
Nombre de stratégies	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
1	97	68,3	92	66,7	48	38,4	85	62,5
2	41	28,6	38	27,5	50	40,0	43	31,6
3	4	2,8	8	5,8	27	21,6	8	5,9
Total	142	100	138	100	125	100	136	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le R PSVT:R1, MRT1, MCT1 et CFT1 dans les verbatim Stratégies. Entre 31 et 62% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie, selon les tests.

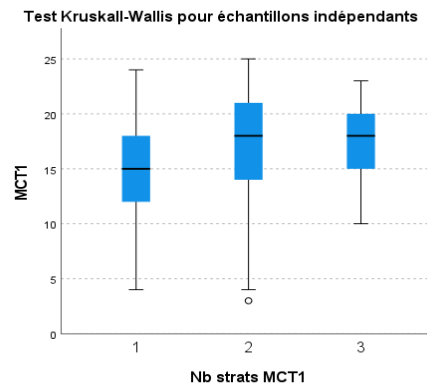
Tableau A27 – Table de fréquence du nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le R PSVT:R1, MRT1, MCT1 dans le QCM Stratégies

	R PSVT:R1		MRT1		MCT1		CFT1	
Nombre de stratégies	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%	<i>N</i>	%
1	95	57,9	58	40,8	61	41,8	94	64,4
2	45	27,4	76	53,5	76	52,1	40	27,4
3	5	3,0	8	5,6	9	6,2	12	8,2
4	1	0,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Total	146	100	142	100	146	100	146	100

Légende. *N* = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants.

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans le R PSVT:R1, MRT1, MCT1 et CFT1 dans les QCM Stratégies. Entre 31 et 59% des étudiants déclarent mobiliser plus d'une stratégie, selon les tests.

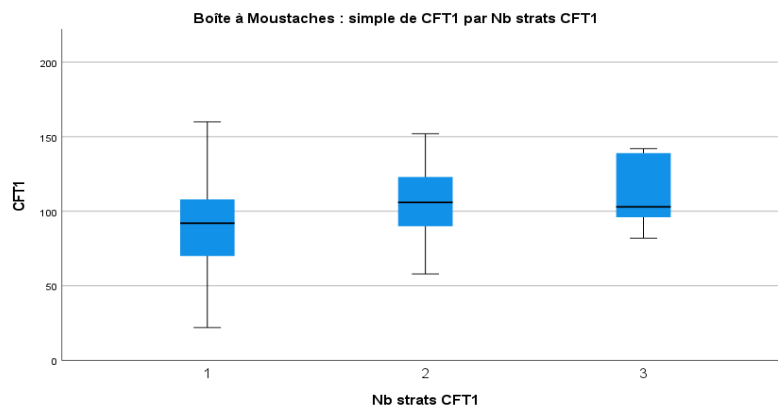
Figure A28 – Distribution du MCT1 selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies



Légende. MCT1 = scores du MCT au premier recueil ; Nb strats MCT1 = nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies pour le MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées pour le MCT au premier recueil. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser deux ou trois stratégies, et en particulier pour ceux déclarant en mobiliser deux.

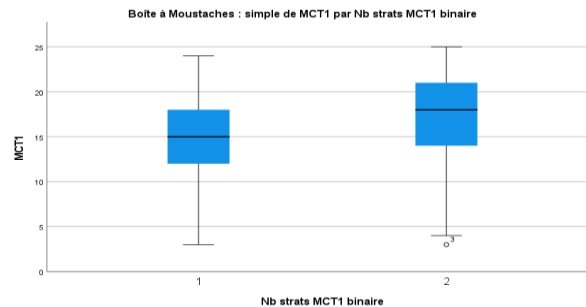
Figure A29 – Distribution du CFT1 selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies



Légende. CFT1 = scores du CFT au premier recueil ; Nb strats CFT1 = nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies pour le CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées pour le CFT au premier recueil. La performance est plus élevée pour les étudiants déclarant mobiliser deux et trois stratégies.

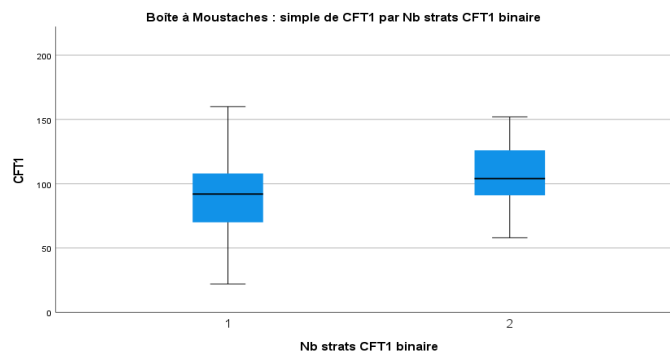
Figure A30 – Distribution du MCT1 selon que les étudiants déclarent utiliser une ou plusieurs stratégies dans les QCM Stratégies



Légende. MCT1 = scores du MCT au premier recueil ; Nb strats MCT1 binaire = nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies pour le MCT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées pour le MCT au premier recueil. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser plus d'une stratégie.

Figure A31 – Distribution du CFT1 selon que les étudiants déclarent utiliser une ou plusieurs stratégies dans les QCM Stratégies



Légende. CFT1 = scores du CFT au premier recueil ; Nb strats CFT1 binaire = nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies pour le CFT au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées pour le CFT au premier recueil. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser plus d'une stratégie.

Tableau A20 - Comparaisons appariées de Combinaison – Scores de MCT1

Échantillon 1- Échantillon 2	Statistiques de test	Erreur standard	Statistiques de test standard	<i>p</i>	Sig. Sig. ^a
QCMT-QCMI	23,000	59,697	0,385	0,700	1,000
QCMT-QCMK	50,600	46,241	1,094	0,274	1,000
QCMT-QCMV	-54,291	42,594	-1,275	0,202	1,000
QCMT-QCMA	62,200	46,241	1,345	0,179	1,000
QCMT-QCMU	-77,657	42,513	-1,827	0,068	1,000
QCMT-QCMJ	77,778	44,496	1,748	0,080	1,000
QCMi-QCMK	-27,600	46,241	-0,597	0,551	1,000
QCMi-QCMV	-31,291	42,594	-0,735	0,463	1,000
QCMi-QCMA	39,200	46,241	0,848	0,397	1,000
QCMi-QCMU	-54,657	42,513	-1,286	0,199	1,000
QCMi-QCMJ	-54,778	44,496	-1,231	0,218	1,000
QCMK-QCMV	-3,691	19,717	-0,187	0,852	1,000
QCMK-QCMA	11,600	26,698	0,434	0,664	1,000
QCMK-QCMU	-27,057	19,541	-1,385	0,166	1,000
QCMK-QCMJ	27,178	23,545	1,154	0,248	1,000
QCMV-QCMA	7,909	19,717	0,401	0,688	1,000
QCMV-QCMU	23,366	7,606	3,072	0,002	0,060
QCMV-QCMJ	23,487	15,178	1,547	0,122	1,000
QCMA-QCMU	-15,457	19,541	-0,791	0,429	1,000
QCMA-QCMJ	-15,578	23,545	-0,662	0,508	1,000
QCMU-QCMJ	0,121	14,948	0,008	0,994	1,000

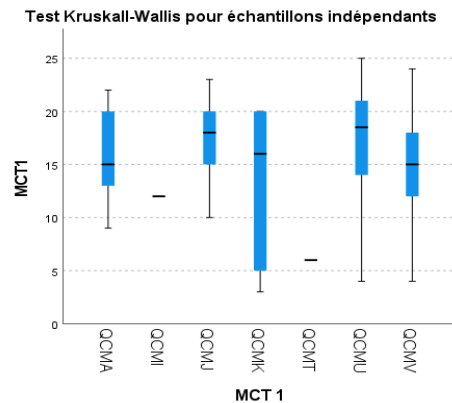
Légende. *p* = valeur de *p*.

Note. Tableau produit par SPSS.

Chaque ligne teste l'hypothèse nulle selon laquelle les distributions Échantillon 1 et Échantillon 2 sont égales. Les significations asymptotiques (tests bilatéraux) sont affichées. Le niveau de signification est de ,050.

a. Les valeurs de signification ont été ajustées par la correction Bonferroni pour plusieurs tests.

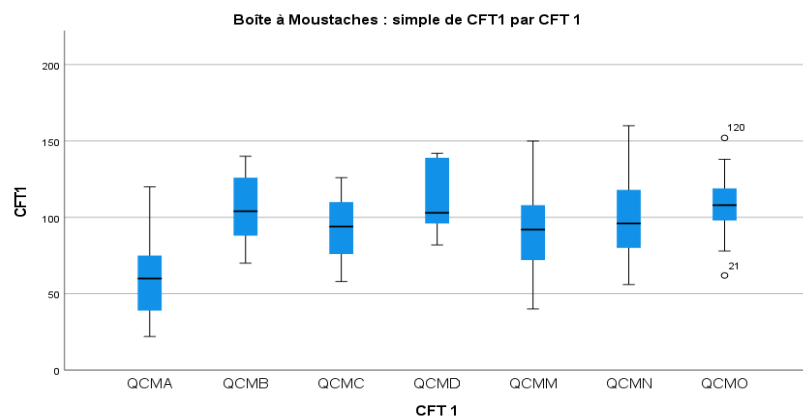
Figure A33 – Distribution du MCT1 selon que les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies



Légende. MCT1 = scores du MCT au premier recueil ; Se référer au tableau 20 pour consulter les définitions des catégories mobilisées.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées pour le MCT au premier recueil. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser la combinaison QCMU (transformation mentale et comparaison à partir d'un élément saillant) sur les étudiants déclarant mobiliser la stratégie QCMV (transformation mentale).

Figure A34 – Distribution du CFT1 selon les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies



Légende. CFT1 = scores du CFT au premier recueil ; Se référer au tableau 20 pour consulter les définitions des catégories mobilisées.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon les combinaisons de stratégies déclarées mobilisées pour le CFT au premier recueil. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant mobiliser la combinaison QCMD (Autre stratégie- Rotation mentale – Une partie d'un tout).

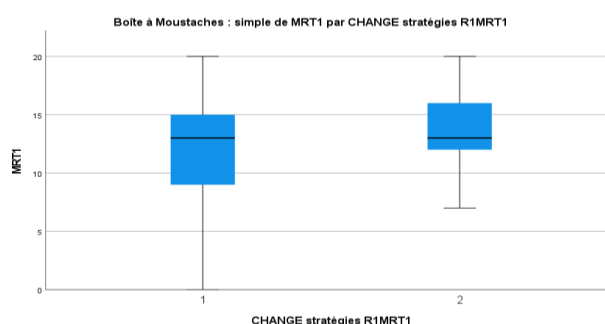
Tableau A21 – Table de fréquence du changement de stratégie pour le R PSVT:R1, le MRT1, le MCT1 et le CFT1 d’après les verbatim Stratégies

	R PSVT:R1		MRT1		MCT1		CFT1	
Changement de stratégie	N	%	N	%	N	%	N	%
Non	97	67,4	94	67,6	50	36,8	89	63,6
Oui	47	32,6	45	32,4	86	63,2	51	36,4
Total	144	100	139	100	136	100	140	100

Légende. N = nombre d’étudiants, % = pourcentage d’étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d’étudiants selon qu’ils changent de stratégie ou pas dans le R PSVT:R1, le MRT1, le MCT1 et le CFT1 d’après les verbatim Stratégies. Selon le test, entre 32,5 et 63% des étudiants déclarent changer de stratégie au sein d’un test.

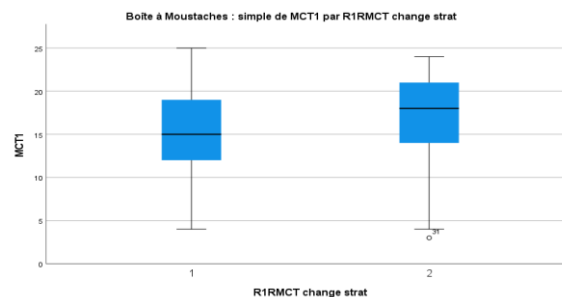
Figure A35 – Distribution du MRT1 selon que les étudiants déclarent changer de stratégie dans les verbatim Stratégies



Légende. MRT1 = scores du MRT au premier recueil ; CHANGE stratégies R1MRT1 1 = l’étudiant utilise la même stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés ; CHANGE stratégies R1MRT1 2 = l’étudiant utilise plus d’une stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés.

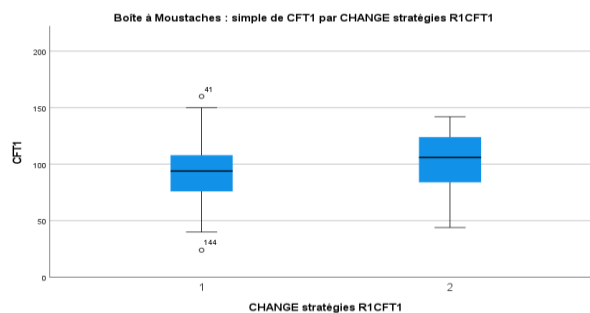
Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MRT des étudiants selon que les stratégies déclarées mobilisées pour le MRT au premier recueil diffèrent pour au moins deux réponses. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant changer de stratégie.

Figure A36 – Distribution du MCT1 selon que les étudiants déclarent changer de stratégie dans les verbatim Stratégies



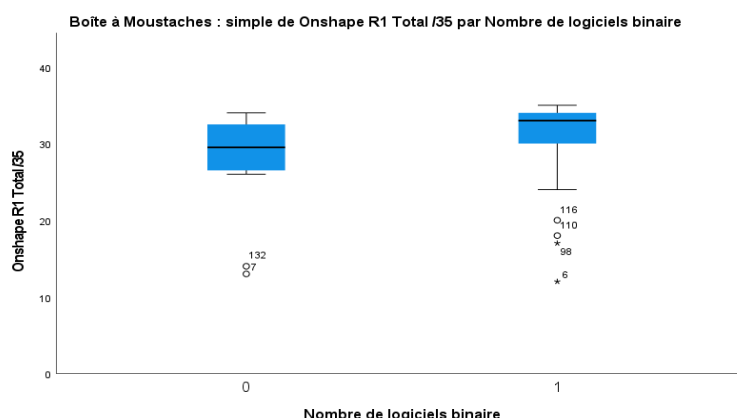
Légende. MCT1 = scores du MCT au premier recueil ; CHANGE stratégies R1MCT1 1 = l'étudiant utilise la même stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés ; CHANGE stratégies R1MCT1 2 = l'étudiant utilise plus d'une stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés. Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon que les stratégies déclarées mobilisées pour le MCT au premier recueil diffèrent pour au moins deux réponses. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant changer de stratégie.

Figure A37 – Distribution du CFT1 selon que les étudiants déclarent changer de stratégie dans les verbatim Stratégies



Légende. CFT1 = scores du CFT au premier recueil ; CHANGE stratégies R1CFT1 1 = l'étudiant utilise la même stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés ; CHANGE stratégies R1CFT1 2 = l'étudiant utilise plus d'une stratégie pour les réponses pour lesquelles les verbatim ont été encodés. Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon que les stratégies déclarées mobilisées pour le CFT au premier recueil diffèrent pour au moins deux réponses. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant changer de stratégie.

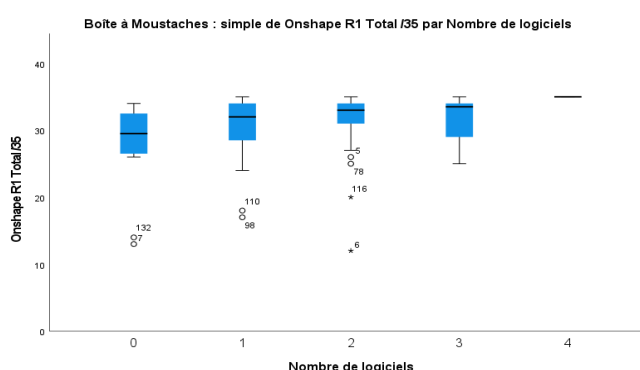
Figure A38 – Distribution des scores de modélisation selon que les étudiants ont pratiqué des logiciels de modélisation



Légende. Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1 ; Nombre de logiciels binaire 0 = aucune pratique de logiciel de modélisation, Nombre de logiciels binaire 1 = les étudiants ont déclaré avoir pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation selon que les étudiants ont déjà pratiqué au moins un logiciel de modélisation. La performance est supérieure pour les étudiants déclarant avoir utilisé au moins un logiciel de modélisation. Leurs scores sont cependant plus étalés.

Figure A39 – Distribution des scores de modélisation selon le nombre de logiciels de modélisation que les étudiants ont pratiqués



Légende. Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1 ; Nombre de logiciels 0 = aucune pratique de logiciel de modélisation, Nombre de logiciels 1 = les étudiants ont déclaré avoir pratiqué un logiciel de modélisation, Nombre de logiciels 2 = les étudiants ont déclaré avoir pratiqué deux logiciels de modélisation, Nombre de logiciels 3 = les étudiants ont déclaré avoir pratiqué trois logiciels de modélisation, Nombre de logiciels 4 = les étudiants ont déclaré avoir pratiqué quatre logiciels de modélisation.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation selon le nombre de logiciel de modélisation pratiqué. La performance semble croître avec l'augmentation du nombre de logiciels de modélisation pratiqués.

Tableau A22 – Table de fréquence des catégories dynamiques (DEP) – Enfance et adolescence ($N = 129$)

	DEPP0A	DEPP0E	DEPP0H	DEPP0K	DEPP0L	DEPP0N	DEPP0O	DEPP1A	DEPP1B	DEPP1C	DEPP1E	DEPP1F	DEPP2B	DEPP2C	DEPP2E	DEPP2F	Total
n	1	1	1	16	5	4	6	2	31	14	4	5	13	18	5	3	129
%	0,8	0,8	0,8	12,4	3,9	3,1	4,7	1,6	24,0	10,9	3,1	3,9	10,1	14,0	3,9	2,3	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories DEP dans l'enfance et l'adolescence. Les catégories à fort effectif, e.g. DEPP0K, DEPP1B et DEPP2C, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs dynamiques dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau A23 – Table de fréquence des catégories manipulatoires (M) – Enfance et adolescence ($N = 129$)

	MR0A	MR0J	MR0K	MR0L	MR0M	MR0N	MR0O	MR1A	MR1B	MR1C	MR1D	MR1E	MR1F	MR2A	MR2B	MR2C	MR2D	MR2E	MR2F	Total
n	1	1	12	12	1	8	4	4	11	3	6	11	4	3	23	6	2	11	6	129
%	0,8	0,8	9,3	9,3	0,8	6,2	3,1	3,1	8,5	2,3	4,7	8,5	3,1	2,3	17,8	4,7	1,6	8,5	4,7	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories M dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif, e.g. MR0K, MR1B et MR2B, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs manipulatoires dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau A24 – Table de fréquence des catégories 2D – Enfance et adolescence ($N = 129$)

	2D0A	2D0B	2D0C	2D1B	2D1C	2D2B	2D2C	Total
n	1	21	14	20	50	4	19	129
%	0,8	16,3	10,9	15,5	38,8	3,1	14,7	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories 2D dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif, e.g. 2D0B, 2D1C et 2D2C, concernent aussi bien des catégories de pratique faible, modérée et élevée de loisirs 2D dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau A25 – Table de fréquence des catégories construction 3D (C3D) – Enfance et adolescence (N = 129)

	C3D0A	C3D0B	C3D0C	C3D1B	C3D1C	C3D2B	C3D2C	Total
<i>n</i>	1	13	7	34	37	9	28	129
%	0,8	10,1	5,4	26,4	28,7	7,0	21,7	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories C3D dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif, e.g. C3D1B et C3D2C, concernent des catégories de pratique modérée et élevée de loisirs de construction dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau A26 – Table de fréquence des catégories artistiques (ART) – Enfance et adolescence (N = 129)

	ART0A	ART0B	ART0C	ART1B	ART1C	ART2B	ART2C	Total
<i>n</i>	1	14	13	29	33	14	25	129
%	0,8	10,9	10,1	22,5	25,6	10,9	19,4	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories ART dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories à fort effectif, e.g. ART1B et ART2C, concernent des catégories de pratique modérée et élevée de loisirs artistiques dans l'enfance et l'adolescence.

Tableau A27 – Table de fréquence des catégories dynamiques (DEP) – Âge adulte (N = 129)

	DEPP20A	DEPP20B	DEPP20E	DEPP20F	DEPP20J	DEPP20K	DEPP20N	DEPP21A	DEPP21B	DEPP21C	DEPP21E	DEPP22B	DEPP22F	Total
<i>n</i>	1	5	12	1	3	41	7	3	43	2	2	8	1	129
%	0,8	3,9	9,3	0,8	2,3	31,8	5,4	2,3	33,3	1,6	1,6	6,2	0,8	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories DEP à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif, e.g. DEPP20K et DEPP21B, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs dynamiques à l'âge adulte.

Tableau A28 – Table de fréquence des catégories manipulatoires (M) – Âge adulte ($N = 129$)

	MR20A	MR20B	MR20E	MR20J	MR20K	MR20L	MR20M	MR20N	MR20O	MR21A	MR21B	MR21C	MR21E	MR22C	MR22E	MR22F	Total
n	1	1	2	12	35	7	2	2	1	15	38	8	1	1	2	1	129
%	0,8	0,8	1,6	9,3	27,1	5,4	1,6	1,6	0,8	11,6	29,5	6,2	0,8	0,8	1,6	0,8	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories M à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif, e.g. MR20K et MR21A, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs manipulatoires à l'âge adulte.

Tableau A29 – Table de fréquence des catégories 2D (2D) – Âge adulte ($N = 129$)

	2D20A	2D20B	2D20C	2D21B	2D21C	2D22B	2D22C	Total
n	1	75	16	16	16	1	4	129
%	0,8	58,1	12,4	12,4	12,4	0,8	3,1	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories 2D à l'âge adulte. La catégorie à fort effectif, i.e. 2D20B, concerne une catégorie de pratique faible de loisirs 2D à l'âge adulte.

Tableau A30 – Table de fréquence des catégories construction 3D (C3D) – Âge adulte ($N = 129$)

	C3D20A	C3D20B	C3D20C	C3D21B	C3D21C	C3D22C	Total
n	1	102	13	8	4	1	129
%	0,8	79,1	10,1	6,2	3,1	0,8	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories 3D à l'âge adulte. La catégorie à fort effectif, i.e. C3D20B, concerne une catégorie de pratique faible de loisirs 3D à l'âge adulte.

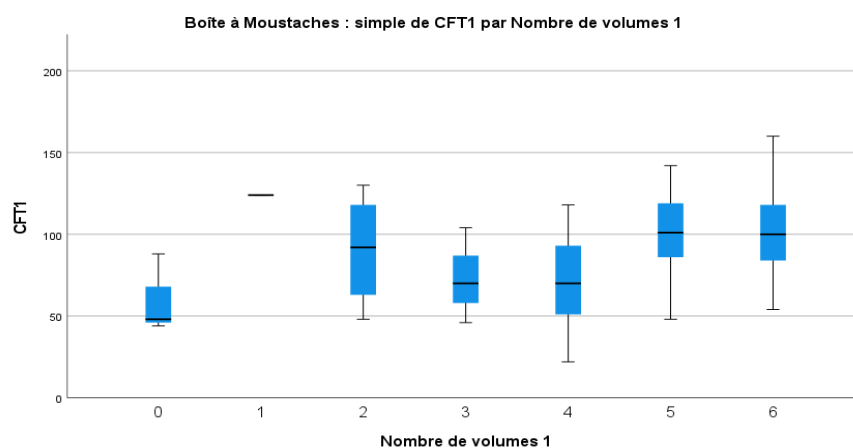
Tableau A31 – Table de fréquence des catégories artistiques (ART) – Âge adulte (N = 129)

	ART20A	ART20B	ART20C	ART21B	ART21C	ART22B	ART22C	Total
<i>n</i>	1	52	2	61	5	6	2	129
%	0,8	40,3	1,6	47,3	3,9	4,7	1,6	100

Légende. N = nombre d'étudiants, % = pourcentage d'étudiants

La table de fréquence indique le nombre et le pourcentage d'étudiants mobilisant les catégories ART à l'âge adulte. Les catégories à fort effectif, e.g. ART20B et ART21B, concernent des catégories de pratique faible et modérée de loisirs artistiques à l'âge adulte.

Figure A40 – Distribution des scores du CFT1 selon le nombre de volumes fonctionnels produit

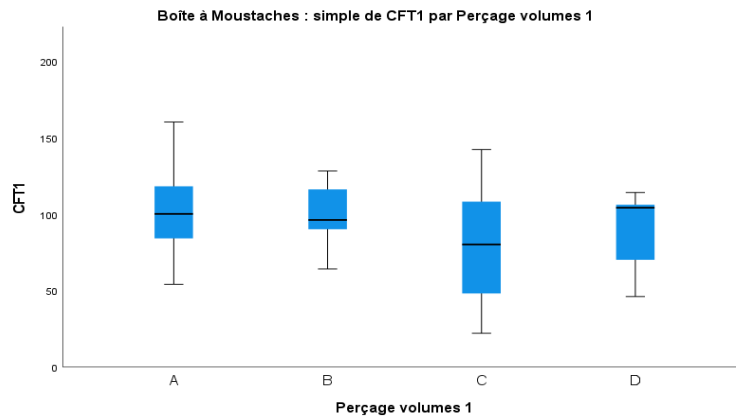


Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Nombre de volumes 1 : nombre de volumes fonctionnels produit au premier recueil

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT1 des étudiants selon le nombre de volumes fonctionnels qu'ils ont produits.

Le nombre de volumes fonctionnels produits semble croître avec les scores de CFT, à l'exception des étudiants qui ont produit 2 volumes, leur effectif étant cependant faible ($n=4$).

Figure A41 – Distribution des scores du CFT1 selon les catégories Nombre de volumes –perçage

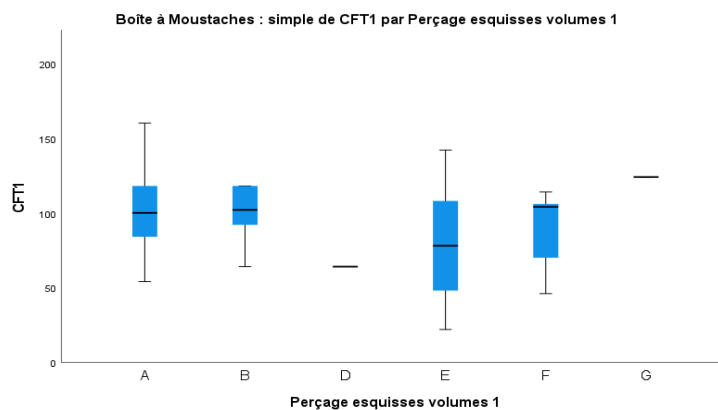


Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Perçage volumes 1 : stratégie de perçage adoptée au premier recueil et nombre de volumes fonctionnels produits.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon les catégories Perçage – volumes.

Les scores du CFT1 sont plus faibles pour les étudiants des catégories C, c.-à-d. les étudiants qui ne parviennent pas à réaliser les six volumes et qui percent directement.

Figure A42 – Distribution des scores du CFT1 selon les catégories Nombre de volumes – esquisses - perçage



Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de dessin et de perçage adoptée au premier recueil et nombre de volumes fonctionnels produits.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon les catégories Perçage – esquisses - volumes.

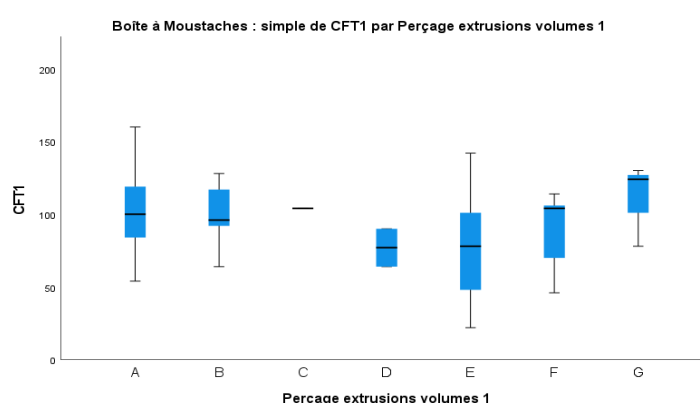
Les scores du CFT1 sont plus élevés pour les étudiants des catégories A et B, c.-à-d. les étudiants qui produisent le nombre d'esquisses et de volumes fonctionnels attendu, en perçant directement pour la catégorie A ($n = 96$) et indirectement pour la catégorie B ($n = 5$).

Tableau A30 – Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories Perçage - esquisses - volumes 1

Test	<i>N</i>	$\chi^2(5)$	<i>p</i>
R PSVT:R1	129	6,06	0,300
MRT1	129	7,14	0,210
MCT1	129	5,60	0,347

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie Perçage – esquisses – volumes et la significativité du résultat.

Figure A43 – Distribution des scores du CFT1 selon les catégories Nombre de volumes – extrusions - perçage



Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Perçage extrusions volumes 1 : stratégie d'extrusion et de perçage adoptée au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon les catégories Perçage – extrusions - volumes.

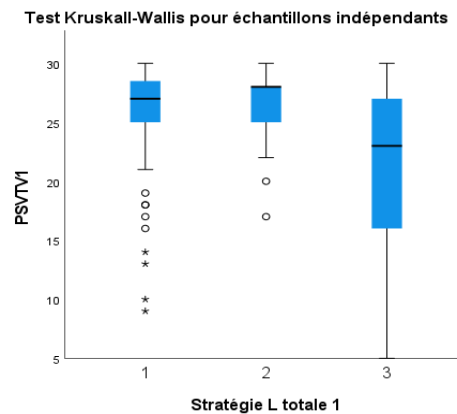
Les scores du CFT1 sont plus élevés pour les étudiants des catégories A et B, c.-à-d. les étudiants qui produisent le nombre d'extrusions et de volumes fonctionnels attendu, en perçant directement pour la catégorie A (*n* = 96) et indirectement pour la catégorie B (*n* = 5).

Tableau A31 – Résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et les catégories Perçage - extrusions - volumes 1

Test	<i>N</i>	$\chi^2(6)$	<i>p</i>
PSVT:V1	127	7,72	0,260
R PSVT:R1	129	8,97	0,175
MRT1	129	6,65	0,354
MCT1	129	6,15	0,406

Légende. *N* = nombre d'étudiants, χ^2 = valeur du résultat du test de Kruskal-Wallis, *p* = valeur de *p*
Ce tableau indique les résultats du test de Kruskal-Wallis pour le PSVT:V1, le R PSVT:R1, le MRT1 et le MCT1 et la catégorie Perçage – extrusions – volumes et la significativité du résultat.

Figure A44 – Distribution des scores du PSVT:V1 selon les stratégies de la longueur totale

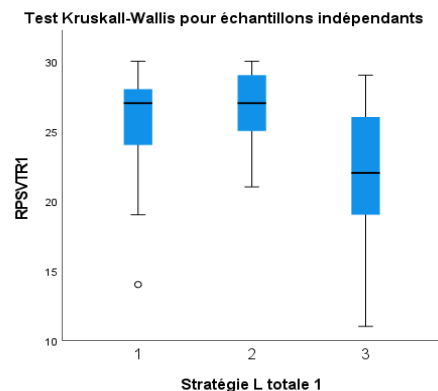


Légende. PSVTV1= scores obtenus au PSVT:V au premier recueil, Stratégie L totale 1 : stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V des étudiants selon la stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

Les étudiants obtenant les meilleurs scores au PSVT:V1 définissent la longueur totale, avec un avantage pour ceux qui la définissent entre les deux extrémités de la pièce.

Figure A45 – Distribution des scores du R PSVT:R1 selon les stratégies de définition de la longueur totale

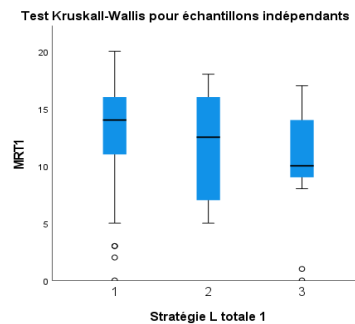


Légende. RPSVTR1 = scores obtenus au R PSVT:R au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R des étudiants selon la stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

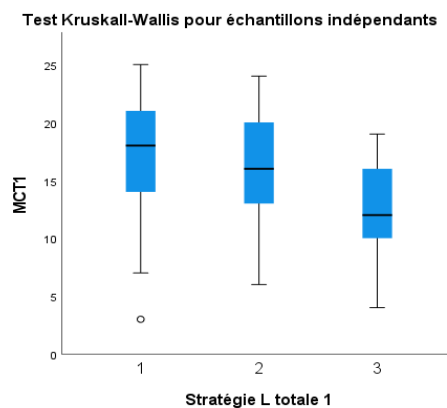
Les étudiants obtenant les meilleurs scores au R PSVT:R 1 définissent la longueur totale, avec un avantage pour ceux qui la définissent entre les deux extrémités de la pièce.

Figure A46 – Distribution des scores du MRT1 selon les stratégies de définition de la longueur totale



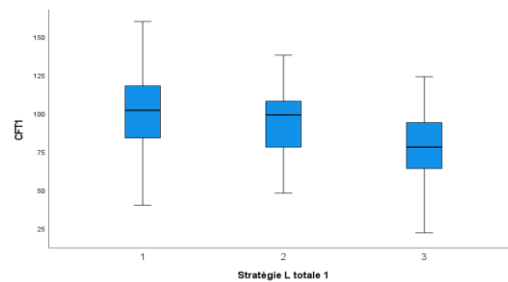
Légende. MRT1 = scores obtenus au MRT au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.
Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MRT des étudiants selon la stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.
Les étudiants obtenant les meilleurs scores au MRT1 définissent la longueur totale, avec un avantage pour ceux qui la décomposent en plusieurs cotes.

Figure A47 – Distribution des scores du MCT1 selon les stratégies de définition de la longueur totale



Légende. MCT1 = scores obtenus au MCT au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.
Les étudiants obtenant les meilleurs scores au MCT1 définissent la longueur totale, avec un avantage pour ceux qui la décomposent en plusieurs cotes.

Figure A48 – Distribution des scores du CFT1 selon les stratégies de définition de la longueur totale

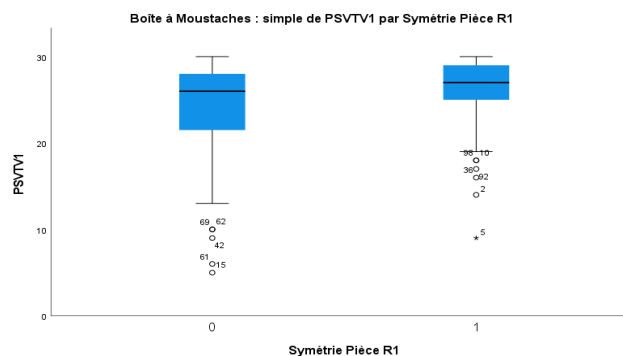


Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Perçage esquisses volumes 1 : stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon la stratégie de définition de la longueur totale adoptée au premier recueil.

Les étudiants obtenant les meilleurs scores au CFT1 définissent la longueur totale, avec un avantage pour ceux qui la décomposent en plusieurs cotes.

Figure A49 – Distribution des scores du PSVT:V1 selon la justesse de la symétrie

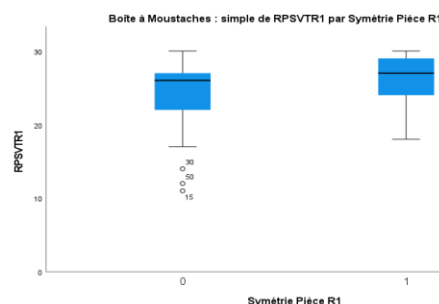


Légende. PSVTV1= scores obtenus au PSVT:V au premier recueil, Symétrie Pièce R1 : justesse de la symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V des étudiants selon la symétrie de la pièce au premier recueil

Les étudiants définissant correctement la symétrie de la pièce obtenant de meilleurs scores au PSVT:V1.

Figure A50 – Distribution des scores du R PSVT:R1 selon la justesse de la symétrie

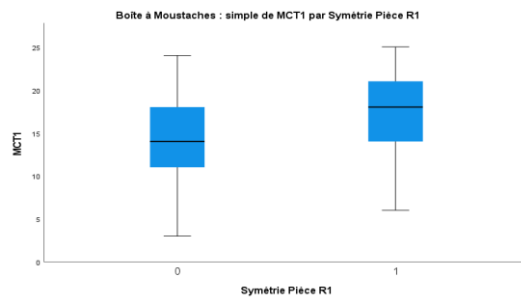


Légende. RPSVTR1 = scores obtenus au R PSVT:R au premier recueil, Symétrie Pièce R1 : justesse de la symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R des étudiants selon la symétrie de la pièce au premier recueil

Les étudiants définissant correctement la symétrie de la pièce obtenant de meilleurs scores au R PSVT:R1.

Figure A51 – Distribution des scores du MCT1 selon la justesse de la symétrie

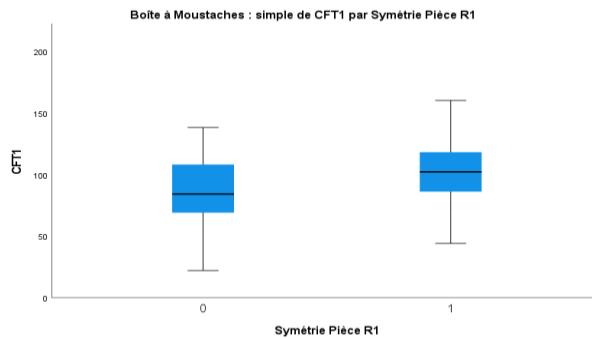


Légende. MCT1 = scores obtenus au MCT au premier recueil, Symétrie Pièce R1 : justesse de la symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon la symétrie de la pièce au premier recueil

Les étudiants définissant correctement la symétrie de la pièce obtenant de meilleurs scores au MCT.

Figure A52 – Distribution des scores du CFT1 selon la justesse de la symétrie

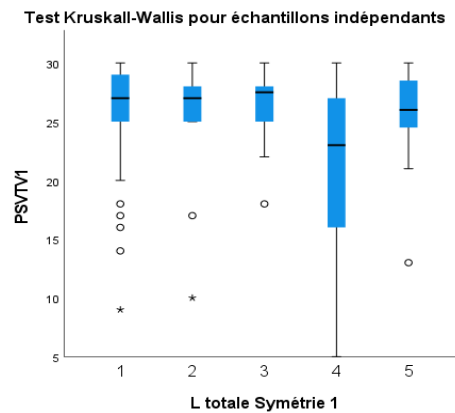


Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil, Symétrie Pièce R1 : justesse de la symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon la symétrie de la pièce au premier recueil

Les étudiants définissant correctement la symétrie de la pièce obtenant de meilleurs scores au CFT.

Figure A53 – Distribution des scores du PSVT:V1 selon les catégories L totale - Symétrie

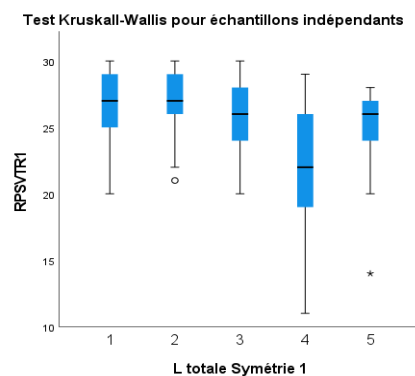


Légende. PSVTV1= scores obtenus au PSVT:V au premier recueil, L totale Symétrie 1 : catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du PSVT:V des étudiants selon la catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Les étudiants obtenant les scores les plus faibles au PSVT:V1, catégorie 4, ne définissent pas la longueur totale de la pièce et la symétrie est incorrecte.

Figure A54 – Distribution des scores du R PSVT:R1 selon les catégories L totale - Symétrie

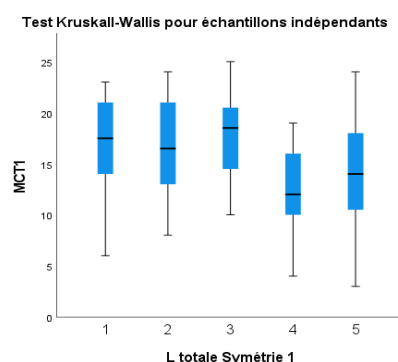


Légende. RPSVTR1 = scores obtenus au R PSVT:R au premier recueil L totale Symétrie 1 : catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du R PSVT:R des étudiants selon la catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Les étudiants obtenant les scores les plus faibles au R PSVT:R1, catégorie 4, ne définissent pas la longueur totale de la pièce et la symétrie est incorrecte.

Figure A55 – Distribution des scores du MCT1 selon les catégories L totale - Symétrie

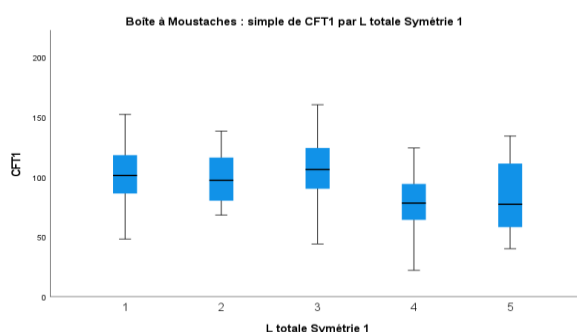


Légende. MCT1 = scores obtenus au MCT au premier recueil L totale Symétrie 1 : catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du MCT des étudiants selon la catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Les étudiants obtenant les scores les plus faibles au MCT1, catégorie 4, ne définissent pas la longueur totale de la pièce et la symétrie est incorrecte.

Figure A56 – Distribution des scores du CFT1 selon les catégories L totale - Symétrie

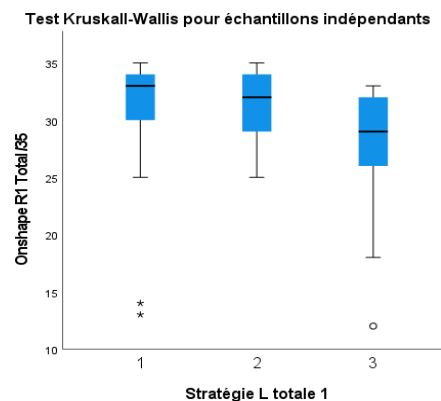


Légende. CFT1 = scores obtenus au CFT au premier recueil L totale Symétrie 1 : catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores du CFT des étudiants selon la catégorie L totale symétrie de la pièce au premier recueil.

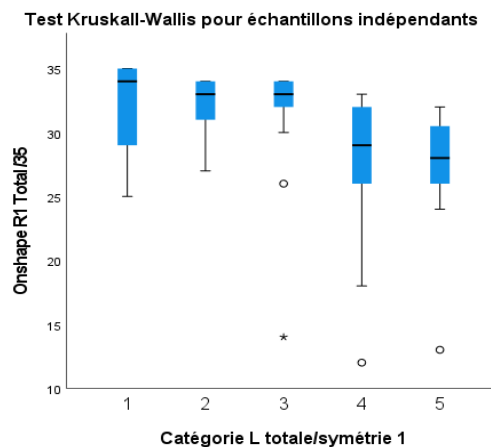
Les étudiants obtenant les scores les plus faibles au CFT1, catégorie 4, ne définissent pas la longueur totale de la pièce et la symétrie est incorrecte ou calculent mal la longueur totale et la symétrie est incorrecte, catégorie 5.

Figure A57 – Distribution des scores de modélisation selon les stratégies de définition de la longueur totale



Légende. OnshapeR1 Total/35 = scores obtenus à l'exercice de modélisation au premier recueil, Stratégie L totale = stratégie de définition de la longueur totale de la pièce adoptée au premier recueil. Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants en fonction de la stratégie de définition de la longueur totale de la pièce qu'ils ont adoptée au premier recueil. Les étudiants obtenant les scores les plus faibles à l'exercice de modélisation, catégorie 3, ne définissent pas la longueur totale de la pièce.

Figure A58 – Distribution des scores de modélisation selon les catégories L totale – Symétrie 1



Légende. OnshapeR1 Total/35 = scores obtenus à l'exercice de modélisation au premier recueil, Catégorie L totale/Symétrie 1 = stratégie de définition de la longueur totale de la pièce adoptée et justesse de la symétrie au premier recueil. Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants en fonction de la stratégie de définition de la longueur totale de la pièce qu'ils ont adoptée et la justesse de la symétrie au premier recueil. Les étudiants obtenant les scores les plus faibles à l'exercice de modélisation, catégorie 4, ne définissent pas la longueur totale de la pièce et la symétrie est incorrecte ou calculent mal la longueur totale et la symétrie est incorrecte, catégorie 5.

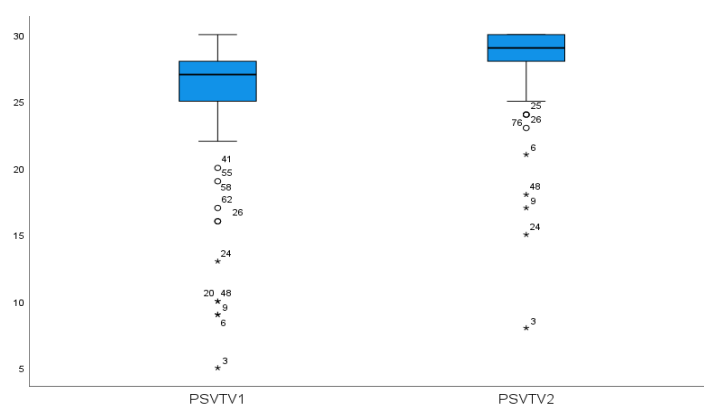
Tableau A32 – Récapitulatif des statistiques descriptives et tests de normalité des tests spatiaux au deuxième recueil

Test	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type	W	p
PSVT:V1	91	8	30	27,84	29,00	3,541	0,618	0,000
R PSVT:R1	92	10	30	26,48	27,50	3,437	0,832	0,000
MRT1	92	2	20	15,50	17,00	4,379	0,827	0,000
MCT1	92	7	25	18,32	18,50	4,496	0,948	0,001
CFT1	92	62	160	124,14	122	25,453	0,984	0,307

Légende. N = nombre d'étudiants, Minimum = score le plus faible observé, Maximum = score le plus élevé observé, Moyenne = moyenne des scores observés, Écart-type = mesure de la dispersion des valeurs ; W = statistique du test de Shapiro-Wilk ; p = valeur de p

Ce tableau présente les statistiques descriptives et les résultats du test de Shapiro-Wilk pour les cinq tests spatiaux. Les scores du CFT1 respectent la loi normale, ce qui n'est pas le cas des scores des autres tests.

Figure A59 - Évolution des scores du PSVT:V

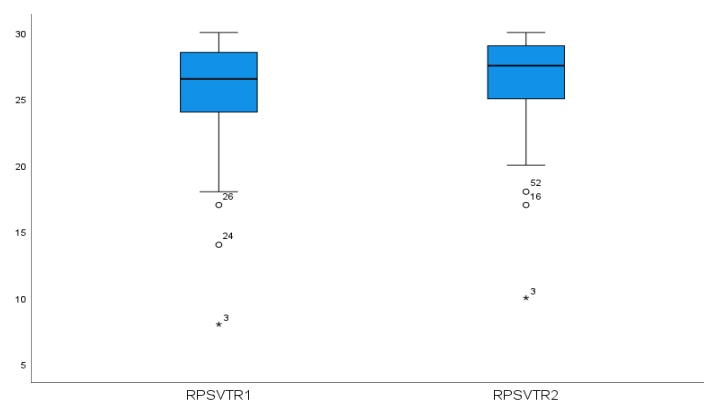


Légende. PSVTV1 = scores du PSVT:V au premier recueil ; PSVTV2 = scores du PSVT:V au second recueil.

Ce diagramme illustre la distribution des scores du PSVT:V aux deux recueils.

Les scores au second recueil ont augmenté et se sont resserrés. Six étudiants restent cependant décrochés de la cohorte aux deux recueils.

Figure A60 - Évolution des scores du R PSVT:R

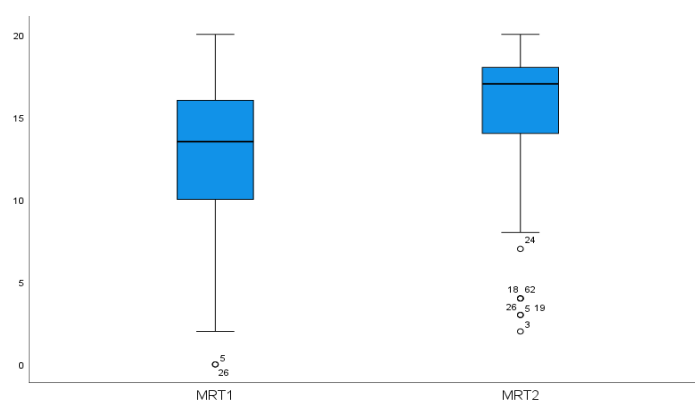


Légende. RPSVTR1 = scores du R PSVT:R au premier recueil ; RPSVTR2 = scores du R PSVT:R au second recueil.

Ce diagramme illustre la distribution des scores du R PSVT:R aux deux recueils.

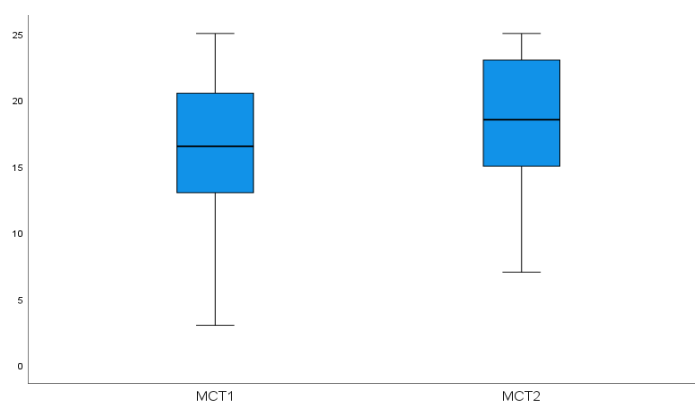
Les scores au second recueil ont augmenté et se sont un peu resserrés.

Figure A61 - Évolution des scores du MRT



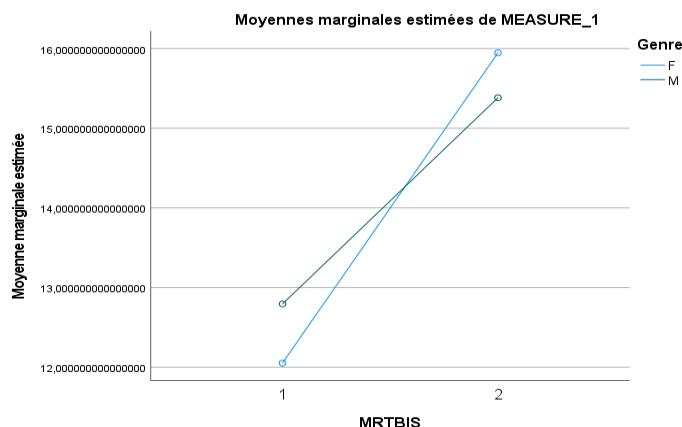
Légende. MRT1 = scores du MRT au premier recueil ; MRT2 = scores du MRT au second recueil.
Ce diagramme illustre la distribution des scores du MRT aux deux recueils.
Les scores au second recueil ont augmenté et se sont nettement resserrés. Un petit groupe décroche de la cohorte au second recueil.

Figure A62 - Évolution des scores du MCT



Légende. MCT1 = scores du MCT au premier recueil ; MCT2 = scores du MCT au second recueil.
Ce diagramme illustre la distribution des scores du MCT aux deux recueils.
Les scores au second recueil ont augmenté et se sont resserrés.

Figure A63 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MRT selon le genre

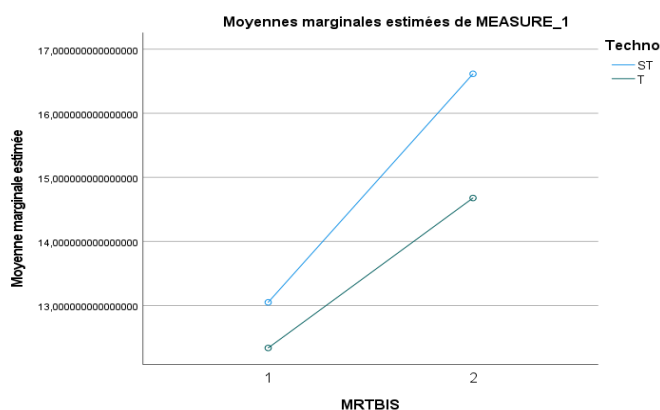


Légende. MRTBIS 1 = scores du recueil 1 du MRT ; MRTBIS 2 = scores du recueil 2 du MRT ; F = femmes ; M = hommes.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MRT des femmes et des hommes.

Les femmes progressent d'avantage que les hommes et dépassent les hommes en moyennes marginales.

Figure A64 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MRT pour les étudiants avec et sans bagage technologique

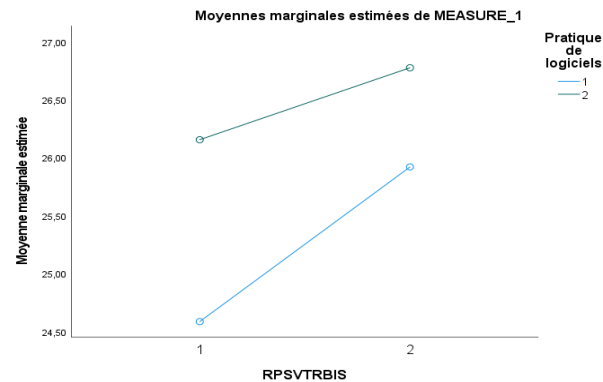


Légende. MRTBIS 1 = scores du recueil 1 du MRT ; MRTBIS 2 = scores du recueil 2 du MRT ; Techno ST = étudiants n'ayant pas reçu d'enseignements technologiques dans leur formation post-bac ; Techno T = ayant reçu des enseignements technologiques dans leur formation post-bac.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MRT des étudiants avec et sans bagage technologique.

Les étudiants sans bagage technologique progressent d'avantage que ceux avec bagage technologique et creusent l'écart au second recueil.

Figure A65 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du R PSVT:R pour les étudiants avec et sans pratique de logiciels de modélisation

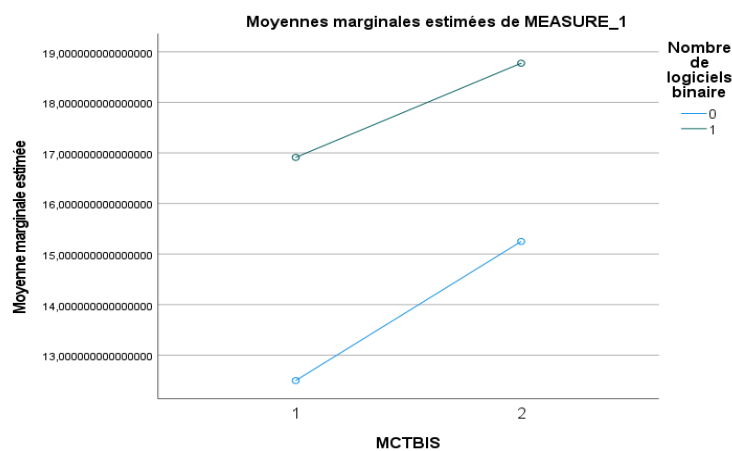


Légende. RPSVTRBIS 1 = scores du R PSVT:R au recueil 1 ; RPSVTRBIS 2 = scores du R PSVT:R au recueil 2 ; Pratique de logiciels 1 = étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ; Pratique de logiciels 2 = ayant pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores du R PSVT:R des étudiants selon leur pratique des logiciels de modélisation.

Les étudiants sans pratique de logiciel de modélisation ont progressé davantage. Les écarts sont maintenus au second recueil.

Figure A66 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MCT pour les étudiants avec et sans pratique de logiciels de modélisation

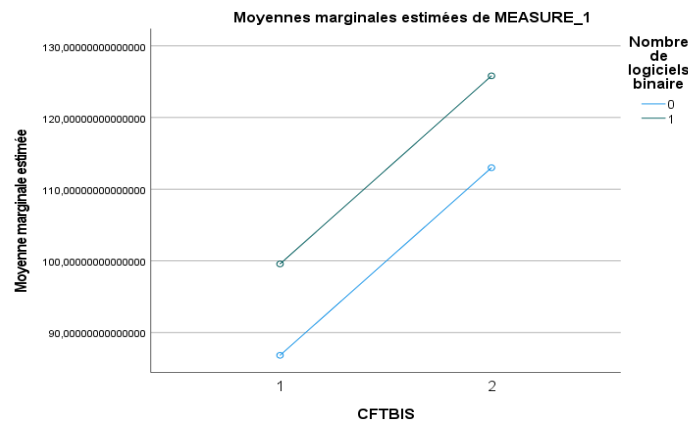


Légende. MCTBIS 1 = scores du MCT au recueil 1 ; 2 = scores du MCT au recueil 2 ; Pratique de logiciels 0 = étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ; Pratique de logiciels 1 = ayant pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores du MCT des étudiants selon leur pratique des logiciels de modélisation.

Les étudiants sans pratique de logiciel de modélisation ont progressé davantage. Les écarts sont maintenus au second recueil.

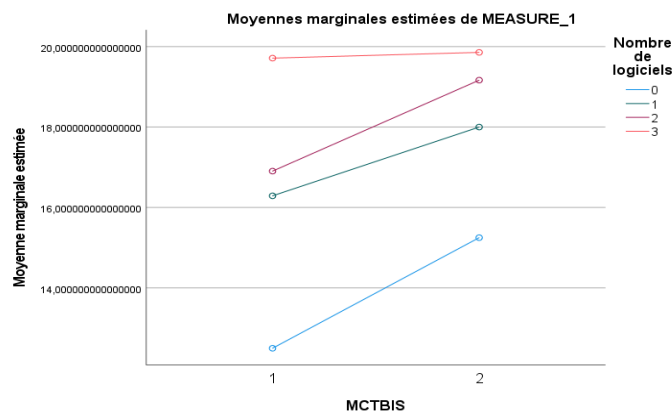
Figure A67 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du CFT pour les étudiants avec et sans pratique de logiciels de modélisation



Légende. CFTBIS 1 = scores du CFT au recueil 1 ; 2 = scores du CFT au recueil 2 ; Pratique de logiciels 0 = étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ; Pratique de logiciels 1 = ayant pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores du CFT des étudiants selon leur pratique des logiciels de modélisation. Les progressions semblent similaires. Les écarts sont maintenus au second recueil.

Figure A68 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MCT selon le nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre l'école

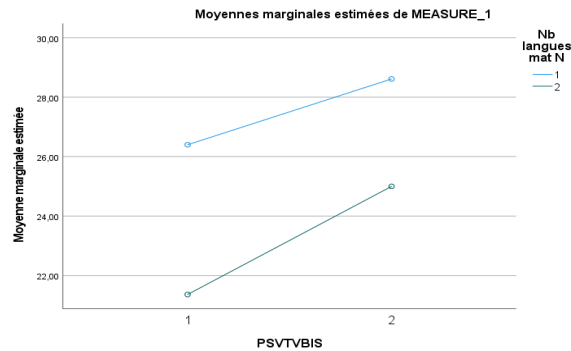


Légende. MCTBIS 1 = scores du MCT au recueil 1 ; 2 = scores du MCT au recueil 2 ; Nombre de logiciels 0 = aucun logiciel de modélisation ; 1 = un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores du MCT des étudiants selon le nombre de logiciels de modélisation pratiqués avant de rejoindre l'école.

Les étudiants sans pratique et ceux ayant pratiqué deux logiciels de modélisation ont progressé davantage que ceux qui en ont pratiqué un.

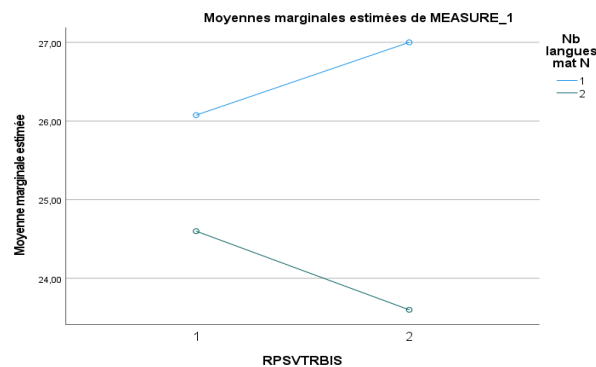
Figure A69 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V pour les étudiants ayant appris une et deux langues maternelles



Légende. PSVTVBIS 1 = scores du recueil PSVT:V au recueil 1 ; PSVTVBIS 2 = scores du PSVT:V au recueil 2 ; Nb langues mat N 1 = étudiants appris une langue maternelle ; Nb langues mat N 2 = étudiants appris une langue maternelle.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants appris une et deux langues maternelles. La progression est légèrement plus marquée pour les étudiants ayant appris deux langues maternelles.

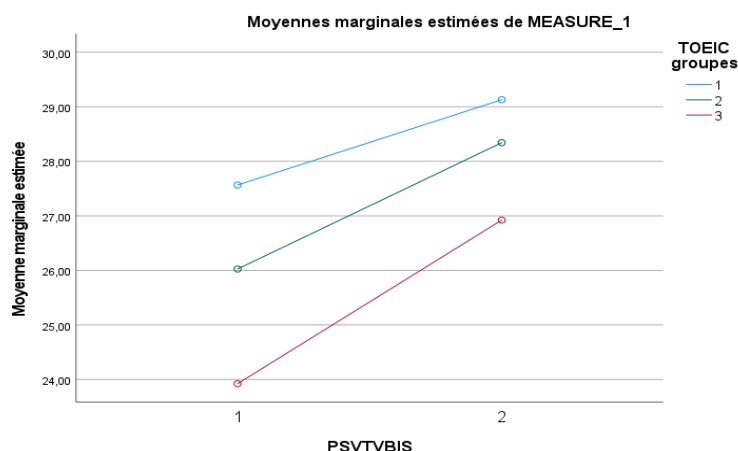
Figure A70 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du R PSVT:R selon le nombre de langues maternelles



Légende. RPSVTRBIS 1 = scores de R PSVT:R du recueil 1 ; RPSVTRBIS 2 = scores de R PSVT:R du recueil 2 ; Nb langues mat N 1 = étudiants ayant appris langue maternelle; Nb langues mat N 2 = étudiants ayant appris deux langues maternelles.

Cette figure illustre l'évolution des scores de R PSVT:R des étudiants ayant appris une et deux langues maternelles. Les étudiants ayant appris une langue maternelle ont progressé significativement.

Figure A71 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V pour les groupes de TOEIC

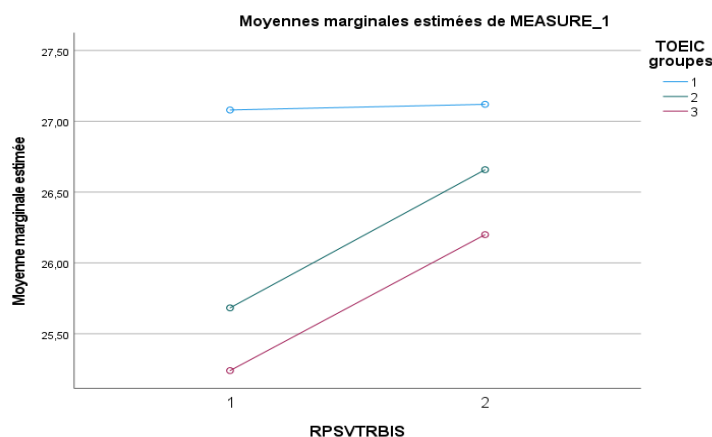


Légende. PSVTVBIS 1 = scores du recueil 1 du PSVT:V ; PSVTVBIS 2 = scores du recueil 2 du PSVT:V ; TOEIC groupes 1 = groupe TOEIC fort ; TOEIC groupes 2 = groupe TOEIC moyen ; TOEIC groupes 3 = groupe TOEIC faible.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon leur niveau d'anglais.

Tous les étudiants ont progressé significativement. La meilleure progression concerne la catégorie des étudiants aux scores de TOEIC faibles, dont les scores étaient les plus faibles au premier recueil.

Figure A72 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du R PSVT:R selon le niveau d'anglais des étudiants



Légende. RPSVTRBIS 1 = scores du recueil 1 du R PSVT:R ; RPSVTRBIS 2 = scores du recueil 2 du R PSVT:R ; 1 = groupe TOEIC fort ; 2 = groupe TOEIC moyen ; 3 = groupe TOEIC faible.

Cette figure illustre l'évolution des scores de R PSVT:R des étudiants selon leur niveau d'anglais.

La catégorie des étudiants aux scores de TOEIC modérés a progressé significativement.

Tableau A32 – Moyennes marginales pour les interactions nombre de langues maternelles, scores de TOEIC et évolution de la performance au R PSVT:R

Nombre de langues maternelles	Groupe TOEIC	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	27,182	0,694	25,801	28,562
		2	27,864	0,592	26,687	29,040
	2	1	25,676	0,535	24,611	26,740
		2	26,730	0,456	25,822	27,637
	3	1	25,619	0,710	24,206	27,032
		2	26,571	0,606	25,367	27,776
2	1	1	26,333	1,880	22,595	30,071
		2	21,667	1,602	18,480	24,853
	2	1	24,667	1,880	20,929	28,405
		2	24,667	1,602	21,480	27,853
	3	1	23,250	1,628	20,013	26,487
		2	24,250	1,388	21,490	27,010

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A33 – Moyennes marginales pour les interactions nombre de langues maternelles, scores de TOEIC et évolution de la performance au CFT

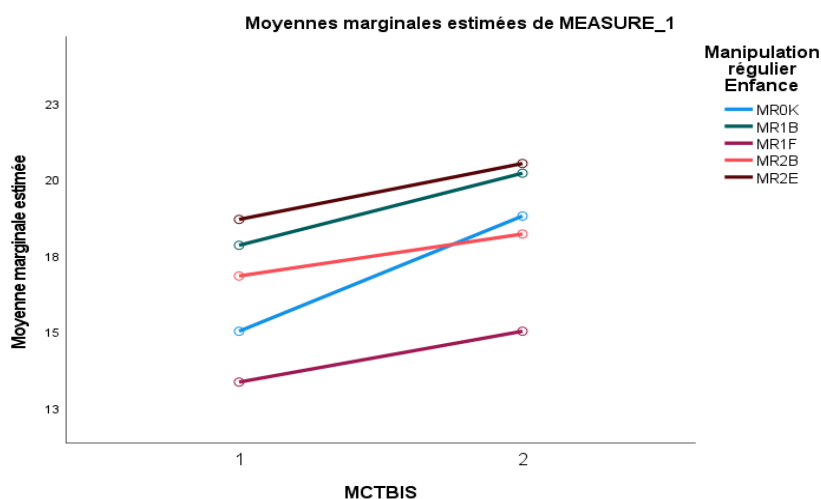
Groupe TOEIC	Nombre de langues maternelles	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	109,000	5,531	98,002	119,998
		2	136,182	5,260	125,723	146,641
	2	1	74,667	14,979	44,884	104,449
		2	105,333	14,245	77,010	133,657
2	1	1	93,676	4,265	85,195	102,156
		2	121,108	4,056	113,043	129,173
	2	1	118,000	14,979	88,218	147,782
		2	138,000	14,245	109,676	166,324
3	1	1	92,952	5,662	81,696	104,209
		2	118,476	5,384	107,771	129,182
	2	1	97,200	11,603	74,131	120,269
		2	114,400	11,034	92,460	136,340

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Pour permettre une meilleure lisibilité des tracés des moyennes marginales, les graphiques ne contiennent que les catégories pour lesquelles un résultat significatif a été constaté.

Figure A73 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MCT selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

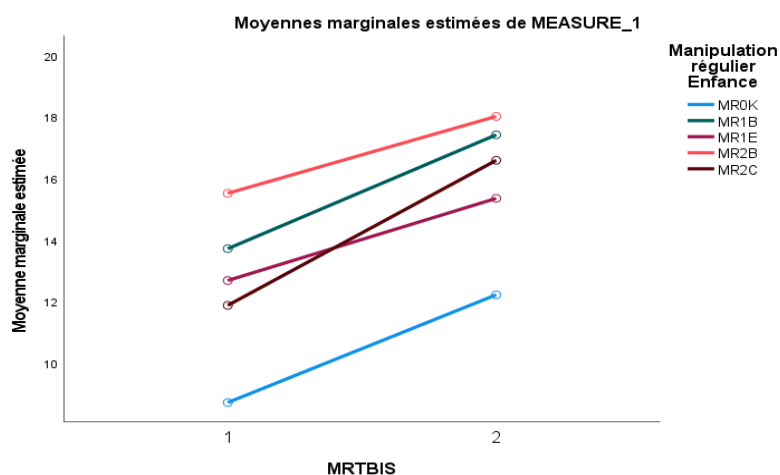


Légende. MCTBIS 1 = scores au recueil 1 du MCT; MCTBIS 2 = scores au recueil 2 du MCT. Voir le tableau A14 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MCT des étudiants selon les loisirs manipulatoires qu'ils pratiquaient dans l'enfance et l'adolescence.

Toutes les catégories progressent. La catégorie MR0K semble connaître la plus forte progression.

Figure A74 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MRT selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

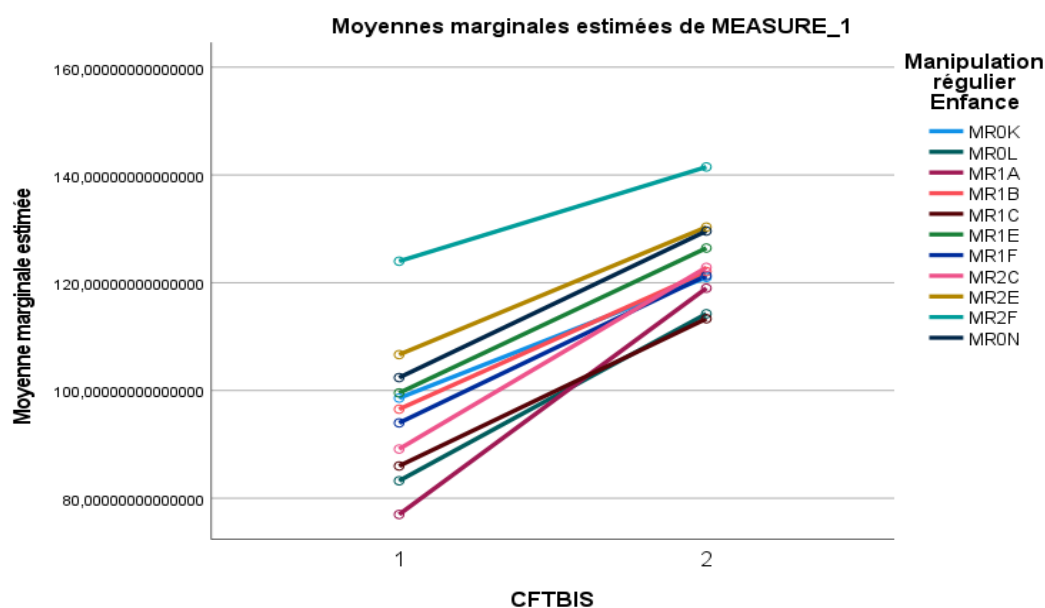


Légende. MRTBIS 1 = scores au recueil 1 du MRT; MRTBIS 2 = scores au recueil 2 du MRT. Voir le tableau A14 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MRT des étudiants selon les loisirs manipulatoires qu'ils pratiquaient dans l'enfance et l'adolescence.

Toutes les catégories progressent. La catégorie MR2C semble connaître la plus forte progression.

Figure A75 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du CFT selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués dans l'enfance et l'adolescence

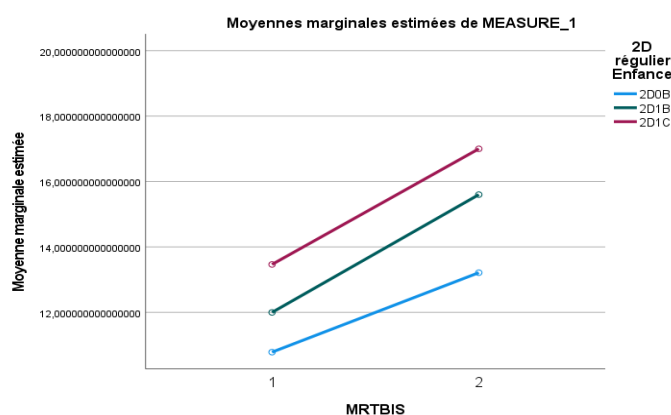


Légende. CFTBIS 1 = scores au recueil 1 du CFT; CFTBIS 2 = scores au recueil 2 du CFT. Voir le tableau A14 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de CFT des étudiants selon les loisirs manipulatoires qu'ils pratiquaient dans l'enfance et l'adolescence.

Toutes les catégories progressent. La catégorie la plus faible, MR1A, semble connaître la plus forte progression et finit par dépasser deux autres catégories.

Figure A76 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MRT selon les catégories de loisirs 2D pratiqués dans l'enfance et l'adolescence



Légende. MRTBIS 1 = scores au recueil 1 du MRT; MRTBIS 2 = scores au recueil 2 du MRT. Voir le tableau A15 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MRT des étudiants selon les loisirs manipulatoires qu'ils pratiquaient dans l'enfance et l'adolescence.

Les trois catégories progressent. La catégorie 2D0B, à pratique de loisirs 2D nulle, montre une plus faible progression.

Tableau A34 – Moyennes marginales estimées pour les interactions loisirs de construction 3D et artistiques pratiqués dans l'enfance et l'adolescence et évolution de la performance au PSVT:V

C3D	Art	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
				Borne inférieure	Borne supérieure
C3D0A	ART0A	23,000	1,816	19,077	26,923
	ART0B				
	ART0C				
	ART1B				
	ART1C				
	ART2B				
	ART2C				
C3D0B	ART0A				
	ART0B	28,187	0,849	26,353	30,022
	ART0C				
	ART1B	28,000	1,049	25,735	30,265
	ART1C				
	ART2B				
	ART2C				
C3D0C	ART0A				
	ART0B				
	ART0C				
	ART1B	29,000	1,816	25,077	32,923
	ART1C				
	ART2B	29,167	1,049	26,902	31,432
	ART2C	26,500	1,816	22,577	30,423
C3D1B	ART0A				
	ART0B	25,750	0,957	23,682	27,818
	ART0C	28,875	0,908	26,913	30,837
	ART1B	27,614	0,509	26,514	28,713
	ART1C	28,500	1,816	24,577	32,423
	ART2B	26,000	1,816	22,077	29,923
	ART2C				
C3D1C	ART0A				
	ART0B				
	ART0C	28,167	1,049	25,902	30,432

	ART1B	30,000	1,816	26,077	33,923
	ART1C	28,250	0,770	26,585	29,915
	ART2B	27,583	0,957	25,516	29,651
	ART2C	27,083	0,741	25,482	28,685
C3D2B	ART0A				
	ART0B	29,000	1,816	25,077	32,923
	ART0C				
	ART1B				
	ART1C	27,750	1,284	24,976	30,524
	ART2B	29,000	1,816	25,077	32,923
	ART2C				
C3D2C	ART0A				
	ART0B				
	ART0C	21,250	1,284	18,476	24,024
	ART1B				
	ART1C	27,300	0,812	25,545	29,055
	ART2B				
	ART2C	27,917	0,540	26,750	29,084

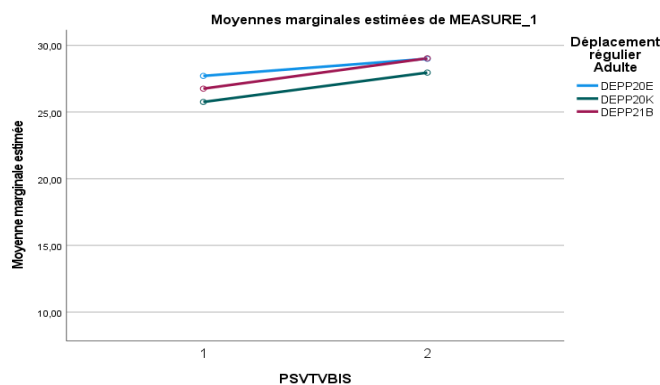
Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard, C3D = loisirs de construction 3D, ART = loisirs artistiques, se référer aux tableaux A16 et A17 en annexe pour une définition des catégories.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Les étudiants C3D1C et ART1B produisent la moyenne marginale la plus élevée.

Pour permettre une meilleure lisibilité des tracés des moyennes marginales, les graphiques ne contiennent que les catégories pour lesquelles un résultat significatif a été constaté.

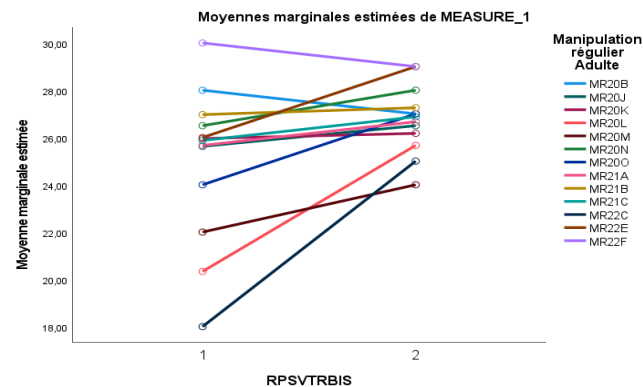
Figure A77 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V pour les étudiants selon les catégories de loisirs dynamiques à l'âge adulte



Légende. PSVTBIS 1 = scores du PSVT:V au recueil 1 ; PSVTBIS 2 = scores du PSVT:V au recueil 2. Voir le tableau 24 pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon les loisirs dynamiques qu'ils pratiquent. Les trois catégories progressent significativement.

Figure A78 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du R PSVT:R selon les catégories de loisirs manipulatoires pratiqués à l'âge adulte

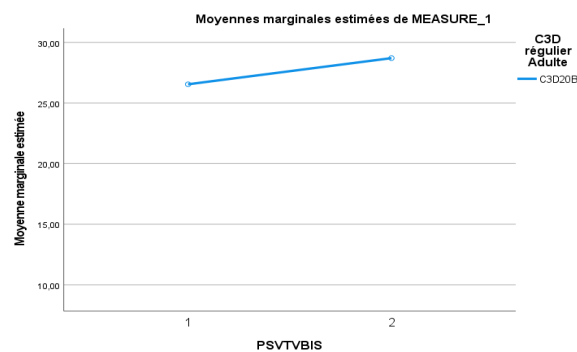


Légende. RPSVTRBIS 1 = scores au recueil 1 du R PSVT:R; RPSVTRBIS 2 = scores au recueil 2 du R PSVT:R. Voir le tableau A14 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de R PSVT:R des étudiants selon les loisirs manipulatoires qu'ils pratiquaient dans l'enfance et l'adolescence.

Les catégories MR20L, MR22C, MR20O et MR22E semblent produire les plus fortes progressions.

Figure A79 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V selon les catégories de loisirs de construction 3D à l'âge adulte

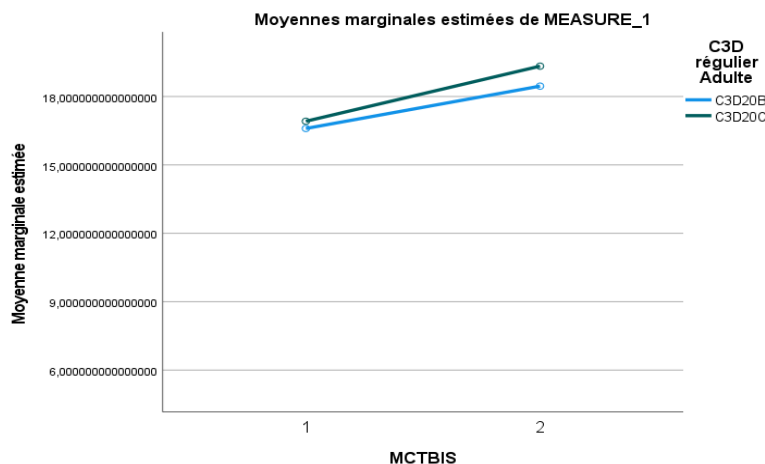


Légende. PSVTVBIS 1 = scores du PSVT:V au recueil 1 ; PSVTVBIS 2 = scores du PSVT:V au recueil 2. Voir le tableau A16 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon les loisirs de construction 3D qu'ils pratiquent.

La catégorie C3D20B est la seule à progresser significativement.

Figure A80 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du MCT pour les étudiants selon les catégories de loisirs de construction 3D à l'âge adulte

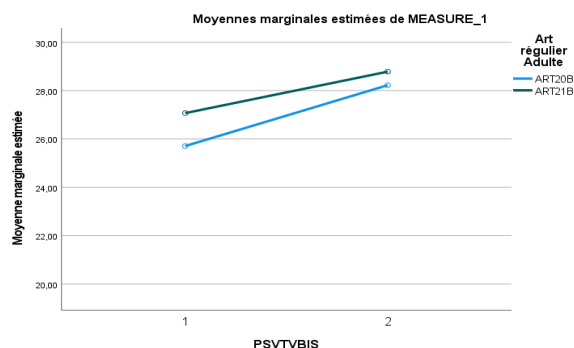


Légende. MCTBIS 1 = scores du recueil 1 ; MCTBIS 2 = scores du recueil 2. Voir le tableau A16 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de MCT des étudiants selon les loisirs de construction 3D qu'ils pratiquent.

Les deux catégories progressent significativement : elles sont caractérisées par une pratique de loisirs de construction 3D nulle.

Figure A81 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVT:V pour les étudiants selon les catégories de loisirs artistiques à l'âge adulte



Légende. PSVTV1 = scores du PSVT:V au recueil 1 ; PSVTV2 = scores du PSVT:V au recueil 2. Voir le tableau A17 en annexe pour les catégories.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon les loisirs artistiques qu'ils pratiquent.

Les deux catégories progressent significativement. La catégorie ART20B, à une pratique de loisirs artistiques nulle, semble progresser davantage.

Tableau A35 – Moyennes marginales pour les interactions scores de MSOL, scores d'AMEC et évolution de la performance au PSVT:V

Groupe MSOL	Groupe AMEC	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	26,929	0,994	24,809	29,048
		2	28,571	0,486	27,536	29,607
	2	1	27,150	0,780	25,487	28,813
		2	29,050	0,381	28,238	29,862
	3	1	29,333	1,576	25,973	32,693
		2	29,000	0,770	27,359	30,641
2	1	1	26,188	0,935	24,195	28,180
		2	29,313	0,456	28,340	30,285
	2	1	26,095	0,652	24,706	27,484
		2	28,786	0,318	28,107	29,464
	3	1	25,250	1,277	22,528	27,972
		2	27,500	0,624	26,171	28,829
3	1	1	26,200	1,221	23,597	28,803
		2	28,600	0,596	27,329	29,871
	2	1	24,000	1,221	21,397	26,603
		2	26,200	0,596	24,929	27,471
	3	1	29,000	1,931	24,885	33,115
		2	27,500	0,943	25,490	29,510

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A36 – Moyennes marginales pour les interactions scores de PCAT, scores d'ALGO et évolution de la performance au MRT

Groupe PCAT	Groupe ALGO	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	15,583	1,725	11,996	19,171
		2	15,000	1,381	12,128	17,872
	2	1	13,000	1,511	9,858	16,142
		2	16,750	1,210	14,235	19,265
	3	1	13,667	2,548	8,368	18,965
		2	18,000	2,040	13,758	22,242
2	1	1	12,312	1,415	9,369	15,256
		2	16,021	1,133	13,664	18,377
	2	1	12,381	1,021	10,257	14,505
		2	15,179	0,818	13,478	16,879
	3	1	14,786	1,607	11,443	18,128
		2	17,071	1,287	14,395	19,748
3	1	1	14,000	3,121	7,510	20,490
		2	16,000	2,498	10,804	21,196
	2	1	12,667	1,494	9,560	15,773
		2	15,208	1,196	12,721	17,696
	3	1	12,667	2,080	8,340	16,993
		2	14,500	1,666	11,036	17,964

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A37 – Moyennes marginales pour les interactions scores de PCAT, scores d’ALGO et évolution de la performance au CFT

Groupe PCAT	Groupe ALGO	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	111,167	11,235	87,802	134,532
		2	132,167	10,892	109,516	154,817
	2	1	103,125	9,840	82,662	123,588
		2	131,750	9,539	111,912	151,588
	3	1	110,000	16,596	75,488	144,512
		2	142,667	16,088	109,209	176,124
2	1	1	106,979	9,219	87,807	126,151
		2	133,729	8,937	115,143	152,315
	2	1	98,762	6,653	84,926	112,598
		2	126,381	6,450	112,968	139,794
	3	1	90,429	10,469	68,657	112,200
		2	121,429	10,149	100,322	142,535
3	1	1	72,000	20,325	29,731	114,269
		2	91,000	19,704	50,023	131,977
	2	1	95,667	9,730	75,432	115,901
		2	126,583	9,433	106,967	146,199
	3	1	77,000	13,550	48,821	105,179
		2	106,333	13,136	79,016	133,651

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A38 – Moyennes marginales pour les interactions scores de PCAT, scores d'AMEC et évolution de la performance au MRT

Groupe PCAT	Groupe AMEC	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	12,687	1,511	9,546	15,829
		2	15,25	1,210	12,735	17,765
	2	1	15,222	1,430	12,249	18,195
		2	17,333	1,145	14,953	19,714
	3	1	.a			
		2	.a			
2	1	1	13,654	1,130	11,304	16,004
		2	16,513	0,905	14,631	18,395
	2	1	12,076	1,099	9,791	14,361
		2	14,864	0,880	13,034	16,693
	3	1	13	1,974	8,896	17,104
		2	16,4	1,580	13,114	19,686
3	1	1	.a			
		2	.a			
	2	1	13,889	1,617	10,526	17,252
		2	15,444	1,295	12,752	18,137
	3	1	12	1,607	8,657	15,343
		2	14,929	1,287	12,252	17,605

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

a. Cette combinaison de niveaux des facteurs n'étant pas observée, la moyenne marginale de la population correspondante n'est pas estimée

Tableau A39 – Moyennes marginales pour les interactions scores de MAPP, scores d'ALGO et évolution de la performance au MRT

Groupe MAPP	Groupe ALGO	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	10,600	1,974	6,496	14,704
		2	14,000	1,580	10,714	17,286
	2	1	15,500	1,361	12,670	18,330
		2	16,896	1,089	14,630	19,161
	3	1	14,333	2,548	9,035	19,632
		2	15,000	2,040	10,758	19,242
2	1	1	13,795	1,192	11,316	16,274
		2	16,436	0,955	14,451	18,421
	2	1	12,394	1,135	10,034	14,754
		2	15,773	0,909	13,883	17,662
	3	1	10,500	1,645	7,080	13,920
		2	13,500	1,317	10,762	16,238
3	1	1	13,500	2,064	9,208	17,792
		2	16,250	1,653	12,813	19,687
	2	1	15,071	1,607	11,729	18,414
		2	17,643	1,287	14,967	20,319
	3	1	11,500	2,703	5,880	17,120
		2	14,250	2,164	9,750	18,750

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A40 – Moyennes marginales estimées pour les interactions scores de MAPP, scores de PCAT, scores d'ALGO et évolution de la performance au MRT

Groupe PCAT	Groupe ALGO	Groupe MAPP	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
						Borne inférieure	Borne supérieure
1	1	1	1	10,500	3,121	4,010	16,990
			2	11,500	2,498	6,304	16,696
		2	1	18,500	2,326	13,663	23,337
			2	16,333	1,862	12,461	20,206
		3	1	17,000	4,413	7,822	26,178
			2	18,000	3,533	10,652	25,348
	2	1	1	12,500	2,207	7,911	17,089
			2	15,750	1,767	12,076	19,424
		2	1	14,000	2,703	8,380	19,620
			2	19,000	2,164	14,500	23,500
		3	1	13,000	3,121	6,510	19,490
			2	16,500	2,498	11,304	21,696
	3	1	1	.a			
			2	.a			
		2	1	14,000	3,121	7,510	20,490
			2	18,500	2,498	13,304	23,696
		3	1	13,000	4,413	3,822	22,178
			2	17,000	3,533	9,652	24,348
2	1	1	1	11,500	3,121	5,010	17,990
			2	16,500	2,498	11,304	21,696
		2	1	12,375	1,773	8,687	16,063
			2	17,042	1,420	14,089	19,994
		3	1	13,000	3,121	6,510	19,490
			2	13,500	2,498	8,304	18,696
	2	1	1	14,800	1,974	10,696	18,904
			2	17,000	1,580	13,714	20,286
		2	1	13,056	1,376	10,194	15,917
			2	16,250	1,102	13,959	18,541
		3	1	7,000	2,080	2,674	11,326
			2	10,000	1,666	6,536	13,464
	3	1	1	14,000	2,548	8,701	19,299
			2	16,333	2,040	12,091	20,576

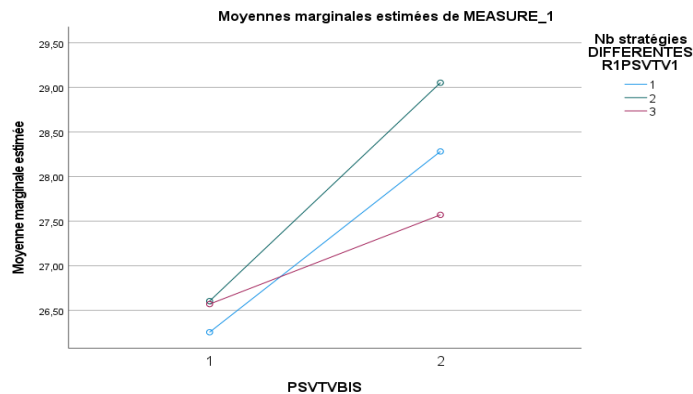
		2	1	15,375	2,064	11,083	19,667
			2	17,625	1,653	14,188	21,062
		3	1	.a			
			2	.a			
3	1	1	1	9,000	4,413	-0,178	18,178
			2	14,000	3,533	6,652	21,348
		2	1	19,000	4,413	9,822	28,178
			2	18,000	3,533	10,652	25,348
		3	1	.a			
			2	.a			
	2	1	1	13,833	2,014	9,644	18,022
			2	16,417	1,613	13,063	19,770
		2	1	10,000	2,548	4,701	15,299
			2	12,667	2,040	8,424	16,909
		3	1	16,000	4,413	6,822	25,178
			2	18,000	3,533	10,652	25,348
	3	1	1	12,000	3,121	5,510	18,490
			2	16,000	2,498	10,804	21,196
		2	1	16,000	4,413	6,822	25,178
			2	16,000	3,533	8,652	23,348
3		1	10,000	3,121	3,510	16,490	
		2	11,500	2,498	6,304	16,696	

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

a. Cette combinaison de niveaux des facteurs n'étant pas observée, la moyenne marginale de la population correspondante n'est pas estimée.

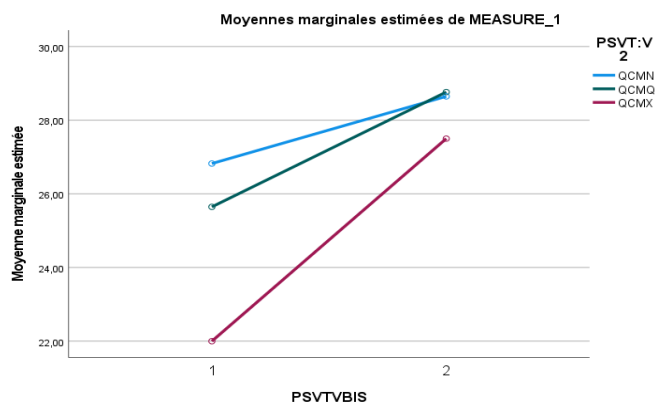
Figure A82 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVTV selon le nombre de stratégies déclarées mobilisées dans les verbatim



Légende. PSVTVBIS 1 = scores du PSVT:V au recueil 1 ; PSVTVBIS 2 = scores du PSVT:V au recueil 2 ; Nb stratégies DIFFÉRENTES R2PSVTV2 = nombre de stratégies différentes déclarées au PSVT:V au second recueil. Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon les combinaisons déclarées mobilisées dans les verbatim.

Les étudiants ayant déclaré mobiliser une et deux stratégies différentes au second recueil progressent significativement, à la différence de ceux ayant déclaré en avoir mobilisé trois.

Figure A83 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils du PSVTV selon la combinaison de stratégies déclarée mobilisée dans les QCM au recueil 2

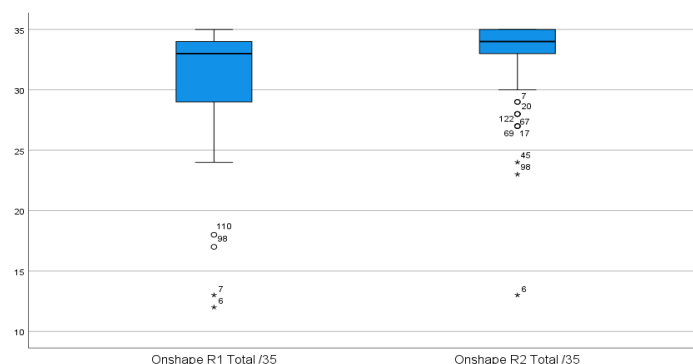


Légende. PSVTVBIS 1 = scores du PSVT:V au recueil 1 ; PSVTVBIS 2 = scores du PSVT:V au recueil 2 ; PSVT:V 2 = combinaisons déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies du second recueil. Les définitions des combinaisons se trouvent dans le tableau 20.

Cette figure illustre l'évolution des scores de PSVT:V des étudiants selon les combinaisons déclarées mobilisées dans les QCM Stratégies du second recueil.

Les trois catégories progressent significativement. La catégorie QCMX, la plus faible au premier recueil, connaît la plus forte progression. C'est la seule de ces trois catégories à mobiliser le changement de point de vue.

Figure A84 – Évolution des scores de modélisation ($N = 98$)

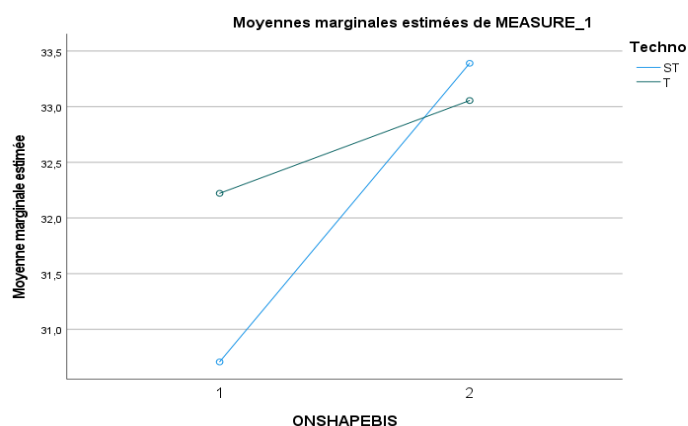


Légende. Onshape R1 Total/35 = scores de modélisation au recueil 1, Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation au recueil 2.

Cette figure illustre l'évolution des scores de modélisation des étudiants avant et après avoir reçu les enseignements du premier semestre.

Les scores ont augmenté et se sont resserrés.

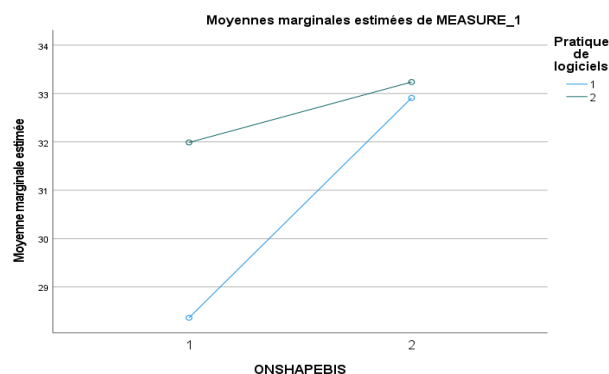
Figure A85 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils de modélisation selon le bagage technologique des étudiants



Légende. Onshape 1 = scores de modélisation au recueil 1, Onshape 2 = scores de modélisation au recueil 2 ; Techno ST : formation post-bac sans enseignements technologiques, T : formation post-bac avec enseignements technologiques.

Cette figure illustre l'évolution des scores de modélisation des étudiants avant et après avoir reçu les enseignements du premier semestre selon le contenu technologique de leur formation post-bac. Les étudiants sans bagage technologique semblent avoir davantage progressé et dépassé leurs pairs.

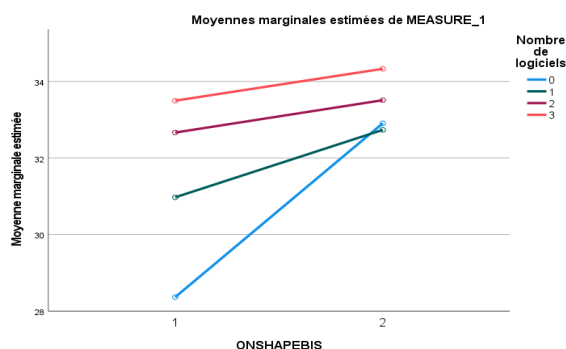
Figure A86 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils de modélisation selon les catégories de pratique de logiciels de modélisation



Légende. Onshape 1 = scores de modélisation au recueil 1, 2 = scores de modélisation au recueil 2 ; Pratique de logiciels 1 : étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation, Pratique de logiciels 2 : étudiants ayant pratiqué au moins un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores de modélisation des étudiants avant et après avoir reçu les enseignements du premier semestre selon le contenu technologique de leur formation post-bac. Les étudiants sans pratique de logiciels de modélisation ont davantage progressé.

Figure A87 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils de modélisation selon le nombre de logiciels de modélisation pratiqués



Légende. ONSHAPEBIS 1 = scores de modélisation au recueil 1, ONSHAPEBIS 2 = scores de modélisation au recueil 2 ; Nombre de logiciels 0 : étudiants n'ayant pratiqué aucun logiciel de modélisation ; Nombre de logiciels 1 : étudiants ayant pratiqué un logiciel de modélisation.

Cette figure illustre l'évolution des scores de modélisation des étudiants avant et après avoir reçu les enseignements du premier semestre selon le nombre de logiciels de modélisation qu'ils ont pratiqué avant leur arrivée à l'école. Les catégories d'étudiants ayant pratiqué moins de trois logiciels de modélisation ont progressé significativement. Les scores des étudiants sans pratique de logiciels de modélisation ont davantage augmenté.

Tableau A41 – Moyennes marginales pour les interactions formation antérieure, pratique de logiciels et évolution de la performance en modélisation

Formation antérieure	Pratique de logiciels	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
Sans technologie	Sans	1	29,900	0,992	27,930	31,870
		2	33,300	0,629	32,051	34,549
	Avec	1	30,968	0,563	29,849	32,086
		2	33,419	0,357	32,710	34,129
Avec technologie	Sans	1	13,000	3,136	6,771	19,229
		2	29,000	1,988	25,051	32,949
	Avec	1	32,585	0,431	31,729	33,440
		2	33,132	0,273	32,590	33,675

Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

Tableau A42 – Moyennes marginales pour les interactions formation antérieure, nombre de logiciels de modélisation pratiqués et évolution de la performance en modélisation

Formation antérieure	Nombre de logiciels	Recueil	<i>M</i>	<i>ES</i>	95% Intervalle de confiance	
					Borne inférieure	Borne supérieure
Sans technologie	0	1	29,900	0,977	27,958	31,842
		2	33,300	0,618	32,071	34,529
	1	1	30,000	0,750	28,510	31,490
		2	33,059	0,474	32,116	34,002
	2	1	32,143	0,826	30,501	33,784
		2	33,857	0,523	32,818	34,896
	3	1	. ^a			
		2	. ^a			
	4	1	. ^a			
		2	. ^a			
Avec technologie	0	1	13,000	3,090	6,858	19,142
		2	29,000	1,956	25,113	32,887
	1	1	31,762	0,674	30,422	33,102
		2	32,476	0,427	31,628	33,324
	2	1	32,960	0,618	31,732	34,188
		2	33,320	0,391	32,543	34,097
	3	1	33,500	1,262	30,992	36,008
		2	34,333	0,798	32,746	35,920
	4	1	35,000	3,090	28,858	41,142
		2	35,000	1,956	31,113	38,887

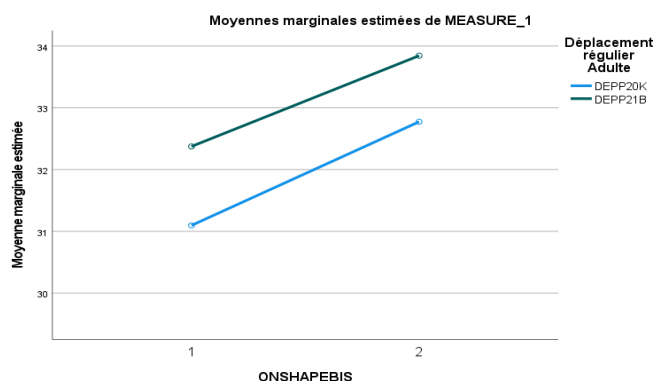
Légende. *M* = moyenne marginale estimée, *ES* = erreur standard.

Note. « Les moyennes marginales estimées fournissent des estimations des valeurs moyennes estimées pour les cellules » (IBM France, 2017, p. 2).

a. Cette combinaison de niveaux des facteurs n'étant pas observée, la moyenne marginale de la population correspondante n'est pas estimée.

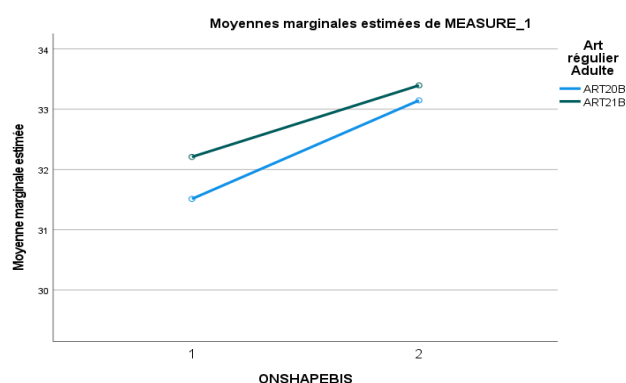
Pour permettre une meilleure lisibilité des tracés des moyennes marginales, les graphiques ne contiennent que les catégories pour lesquelles un résultat significatif a été constaté.

Figure A88 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils de modélisation selon les catégories de loisirs dynamiques pratiqués à l'âge adulte



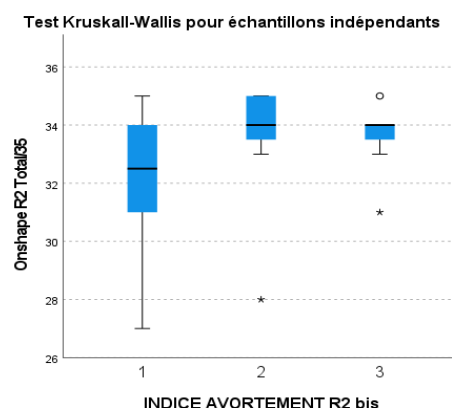
Légende. ONSHAPEBIS 1 = scores de modélisation du recueil 1 ; ONSHAPEBIS 2 = scores de modélisation du recueil 2. Voir le tableau 24 pour les catégories de loisirs.
 Cette figure illustre les évolutions significatives des scores de modélisation des étudiants selon les loisirs dynamiques qu'ils pratiquent.

Figure A89 – Diagramme des moyennes marginales des deux recueils de modélisation selon les catégories de loisirs artistiques pratiqués à l'âge adulte



Légende. ONSHAPEBIS 1 = scores de modélisation du recueil 1 ; ONSHAPEBIS 2 = scores de modélisation du recueil 2. Voir le tableau A17 en annexe pour les catégories de loisirs.
 Cette figure illustre les évolutions significatives des scores de modélisation des étudiants selon les loisirs artistiques qu'ils pratiquent.

Figure A90 - Distribution des scores de modélisation selon la catégorie Avortement – Recueil 2

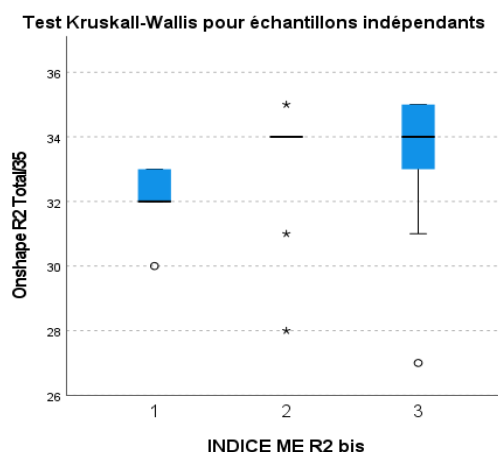


Légende. 1 = nombre d'actions avortées élevé ; 2 = nombre d'actions avortées modéré ; 3 = nombre d'actions avortées faible ; Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation au second recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants ayant avorté beaucoup, moyennement ou peu d'actions.

Les étudiants qui réalisent un nombre d'avortements modéré et faible obtiennent de meilleurs scores de modélisation et leurs scores sont plus resserrés.

Figure A91 - Distribution des scores de modélisation selon la catégorie Erreur – Recueil 2

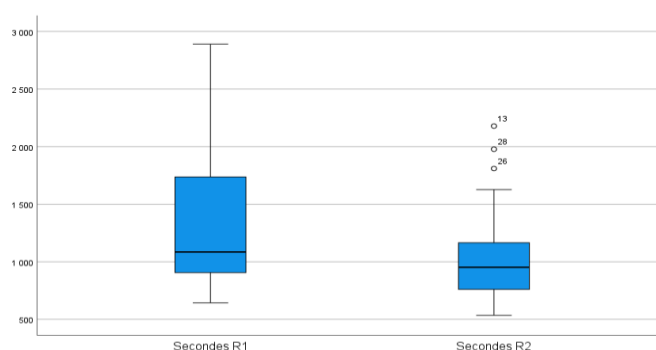


Légende. 1 = nombre de messages d'erreur élevé ; 2 = nombre de messages d'erreur modéré ; 3 = nombre de messages d'erreur faible ; Onshape R2 Total/35 = scores de modélisation au second recueil.

Ces boîtes à moustaches décrivent les distributions des scores de modélisation des étudiants ayant reçu beaucoup, moyennement ou peu de messages d'erreur au second recueil.

Les étudiants qui reçoivent un nombre de messages d'erreur modéré et faible obtiennent de meilleurs scores de modélisation.

Figure A92 - Évolution du temps de réalisation

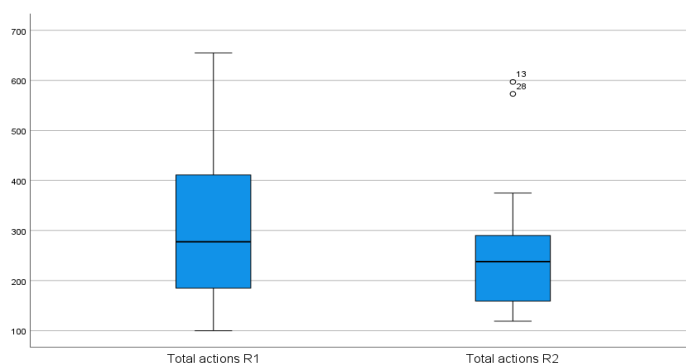


Légende. Secondes R1 = temps de réalisation de l'exercice de modélisation du recueil 1 ; Secondes R2 = temps de réalisation de l'exercice de modélisation du recueil 2.

Cette figure illustre la distribution des temps de réalisation en secondes aux deux recueils.

La distribution du temps de réalisation au second recueil a diminué et s'est resserrée.

Figure A93 - Évolution du nombre d'actions

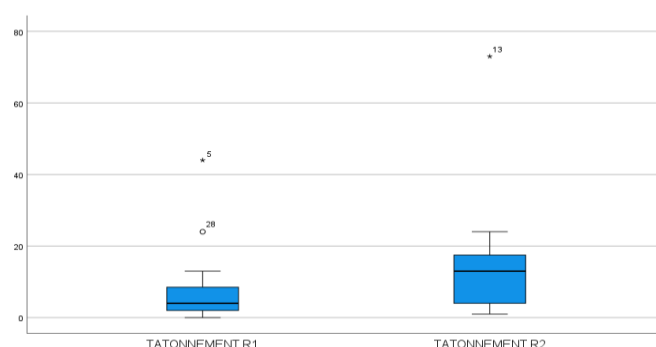


Légende. Total actions R1 = nombre d'actions encodées pour l'exercice de modélisation du recueil 1 ; Total actions R2 = nombre d'actions encodées pour de l'exercice de modélisation du recueil 2.

Cette figure illustre la distribution du nombre d'actions encodées pour l'exercice de modélisation aux deux recueils.

La distribution du nombre d'actions au second recueil a diminué et s'est resserrée.

Figure A94 - Évolution du nombre d'actions de tâtonnement



Légende. Total actions R1 = nombre d'actions de tâtonnement encodées pour l'exercice de modélisation du recueil 1 ; Total actions R2 = nombre d'actions de tâtonnement encodées pour de l'exercice de modélisation du recueil 2. Cette figure illustre la distribution du nombre d'actions de tâtonnement encodées pour l'exercice de modélisation aux deux recueils.

La distribution du nombre d'actions de tâtonnement au second recueil a augmenté et s'est étendue. Il y a de plus grandes disparités entre les sujets de cet échantillon pour cet indicateur.

Tableau A43 - Analyse FFOM du protocole d'enregistrement

	Forces	Faiblesses	Opportunités	Menaces
Observations filmées des apprenants	<p>Observabilité des conversations des sujets</p> <p>Observabilité de la direction des regards, e.g. documents, clavier, voisins.</p>	<p>Protocole expérimental lourd : matériel, disposition</p> <p>Obstruction potentielle de la zone de filmage (e.g. mouvement de l'utilisateur, mauvais placement de la caméra)</p> <p>Traitement des données chronophage dû à la durée des vidéos et au nombre de vidéos par apprenant</p>	<p>Triangulation avec approche complémentaire, i.e. captations.</p>	<p>Qualité de l'enregistrement</p> <p>Perte de données par erreur d'enregistrement</p> <p>Fiabilité de l'encodage</p>
Captation de l'activité à l'écran	<p>Observabilité de l'activité du sujet</p> <p>Observabilité des réactions du logiciel</p> <p>Protocole expérimental discret</p>	<p>Pas d'information sur l'activité de l'utilisateur en cas d'absence d'activité à l'écran</p> <p>Pas d'information directe sur la manipulation du clavier</p> <p>Pas d'information sur la direction du regard de l'utilisateur</p> <p>Traitement des données chronophage dû à la durée des vidéos</p>	<p>Triangulation avec approche complémentaire, i.e. réalisations consultables dans Onshape (i.e. arbre de construction, esquisses, extrusions, dessins techniques générables)</p>	<p>Qualité de l'enregistrement ou de l'observation</p> <p>Perte de données par erreur d'enregistrement</p> <p>Fiabilité de l'encodage</p>