

Apprentissage de la modélisation 3D au secondaire I : La compétence de décomposition géométrique

Analyse des stratégies novices et effets de l'esquisse
préalable avec TinkerCAD

Formation secondaire – Filière A

Mémoire de Master de **Loïc Garcia**

Sous la direction de **Fabienne Liechti Wenger**

Bienne, le **06/05/2026**

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à **Fabienne Liechti Wenger**, ma directrice de mémoire, pour la grande expérience qu'elle a mise au service de ce travail. Sa disponibilité tout au long du processus, la justesse de ses retours, et son ouverture d'esprit face à un sujet qui sortait de son champ habituel ont été précieuses. Elle a su me poser les bonnes questions au bon moment, sans jamais imposer ses propres réponses.

Je remercie le **Service de l'enseignement du canton du Jura (SEN)**, dont le soutien a rendu possible la mise en place du cours facultatif de modélisation et impression 3D au Collège Thurmann. Ce mémoire n'aurait pas pu exister sans cette ouverture institutionnelle à un projet pédagogique encore peu balisé.

Je remercie également l'ensemble des collègues et la direction du **Collège Thurmann** pour leur accueil et leur confiance dans la mise en œuvre concrète de ce projet pilote. Je pense en particulier à **Vanessa Jubin**, qui a porté l'idée du cours facultatif auprès du SEN et sans qui ce projet n'aurait probablement jamais vu le jour.

Je tiens à remercier particulièrement **Édouard Cattin**, mon premier formateur en établissement devenu collègue, pour la confiance qu'il m'a accordée dès le début et pour m'avoir ouvert la porte à de nombreux projets de l'établissement. Son accueil a beaucoup compté dans ma manière de m'approprier le métier.

Mes remerciements vont également aux **élèves du cours facultatif de modélisation et impression 3D**. Ce mémoire repose entièrement sur leur engagement, leur curiosité et leur honnêteté face à des tâches parfois difficiles. Ils sont les véritables sujets de cette recherche, et c'est en les regardant travailler que j'ai appris le plus.

Enfin, et surtout, je remercie ma femme **Mélanie**, qui m'a accompagné tout au long de cette formation à la HEP, dans les moments d'enthousiasme comme dans les soirées plus difficiles. Sa patience et son soutien ont rendu ce parcours possible.

Et mon fils **Helio**, qui ne le sait pas encore, mais qui est à l'origine de tout cela : c'est sa naissance qui a déclenché ma reconversion. Ce mémoire est, à sa manière, un premier pas pour lui montrer ce que peut être un métier qui a du sens.

Résumé

Ce mémoire explore comment des élèves novices du secondaire I développent leur capacité à décomposer des formes complexes en primitives géométriques lors de l'apprentissage de la modélisation 3D avec TinkerCAD, et dans quelle mesure l'introduction d'une esquisse papier préalable facilite cet apprentissage.

La recherche s'inscrit dans un projet pilote de cours facultatif de modélisation et impression 3D mené au Collège Thurmann (Porrentruy, canton du Jura) auprès d'élèves de 12 à 15 ans. La méthodologie relève de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988), démarche de recherche qui conçoit a priori une séquence d'enseignement, l'expérimente en classe et valide ses hypothèses par la confrontation entre prévisions et observations. Elle se structure en deux cycles : un premier cycle diagnostique sans esquisse (Groupe 1, automne 2025), puis un cycle interventionnel avec esquisse annotée obligatoire (Groupe 2, printemps 2026). L'analyse croise les traces TinkerCAD, les esquisses papier et les observations de terrain.

Les résultats montrent que la décomposition additive de formes géométriques simples est intuitivement accessible aux élèves novices, avec ou sans esquisse. En revanche, face à des formes organiques résistantes à l'approche CSG (le cavalier d'échecs), aucun élève ayant tenté le cavalier n'a mobilisé spontanément l'outil *Sketch* pour passer à une approche par profil 2D. Ce résultat confirme que la Strategic Knowledge (Chester, 2007) nécessaire au changement de paradigme reste tacite et inaccessible sans médiation humaine.

L'esquisse papier apporte un bénéfice réel mais limité : elle aide à la planification des objets simples, principalement par les annotations textuelles plutôt que par le dessin qui reste figuratif. Elle ne résout ni le problème des proportions, ni le blocage du changement de paradigme, et elle est progressivement abandonnée par les élèves quand la complexité augmente. Un résultat non anticipé émerge du Groupe 2 : un mécanisme de diffusion de connaissances stratégiques entre pairs, où un élève-relais transmet l'approche par profil à ses camarades après une seule intervention de l'enseignant.

Mots-clés : modélisation 3D, TinkerCAD, décomposition géométrique, esquisse préalable, ingénierie didactique, secondaire I, CSG, savoir tacite.

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé	ii
Table des matières	3
Introduction	7
1.1 Introduction générale.....	7
1.2 Contextualisation	8
1.2.1 Le Plan d’Etudes Romand et l’éducation numérique.....	8
1.2.2 La fabrication numérique dans le paysage éducatif romand	9
1.3 Contexte cantonal : le canton du Jura	9
1.3.1 Vision institutionnelle.....	9
1.3.2 Le projet pilote au Collège Thurmann.....	10
1.4 Contexte spécifique du cours facultatif de modélisation et impression 3D.....	10
1.4.1 L’établissement : Collège Thurmann.....	10
1.4.2 Structure du cours	10
1.4.3 Profil de l’enseignant.....	11
1.4.4 Motivation des élèves.....	12
2 Cadre théorique, problématique et question de recherche	13
2.1 Contexte développemental et éducatif	13
2.1.1 Une fenêtre développementale propice (11-15 ans)	13
2.2 Fondements cognitifs de la modélisation 3D.....	13
2.2.1 La pensée spatiale et ses composantes.....	13
2.2.2 Les niveaux de raisonnement géométrique selon van Hiele	14
2.2.3 De l’holistique à l’analytique	15
2.3 La décomposition en primitives géométriques	16
2.3.1 Processus cognitifs mobilisés	16
2.3.2 Limites de l’approche par primitives volumiques et stratégies alternatives.....	17

2.3.3	Un savoir largement implicite dans l'enseignement.....	17
2.4	Les savoirs tacites en conception CAO	18
2.4.1	Command Knowledge vs Strategic Knowledge	18
2.4.2	Du novice à l'expert : une progression par l'expérience.....	19
2.4.3	Enjeux pour l'enseignement	19
2.5	Médiation cognitive pour l'apprentissage de la décomposition géométrique	19
2.5.1	Externaliser la pensée	20
2.5.2	L'esquisse comme outil de structuration de la pensée	20
2.6	TinkerCAD comme environnement d'observation	21
2.7	Problématique.....	22
2.8	Question(s) de recherche	23
2.8.1	Phase 1 : Diagnostique (Groupe 1 – Automne 2025).....	23
2.8.2	Phase 2 : Intervention (Groupe 2 – Printemps 2026)	23
2.9	Synthèse du cadre théorique : outils conceptuels pour l'analyse	24
3	Démarche méthodologique	25
3.1	Choix méthodologique : Une ingénierie didactique en deux cycles.....	25
3.2	Cycle 1 : Ingénierie diagnostique (Groupe 1)	25
3.2.1	Le dispositif didactique global	25
3.2.2	Analyse a priori : Hypothèses par phases d'apprentissage.....	28
3.2.3	Synthèse des hypothèses pour le Groupe 1	31
3.2.4	Outils de recueil des données	32
3.3	Cycle 2 : Ingénierie interventionnelle (Groupe 2).....	32
3.3.1	Le dispositif didactique global	32
3.3.2	Analyse a priori : Hypothèse pour le groupe 2	36
3.3.3	Synthèse des hypothèses pour le Groupe 2	39
3.3.4	Outils de recueil de données	40
3.4	Grilles d'analyses et critères d'observation.....	40

3.4.1	Décrire : faits observables dans les traces TinkerCAD	41
3.4.2	Interpréter : mobiliser les outils théoriques	41
3.4.3	Analyser les esquisses et croiser avec les mobilisations (Groupe 2)	42
3.4.4	Vue d'ensemble	44
4	Résultats	45
4.1	Analyse a posteriori du Cycle 1 (Groupe 1)	45
4.1.1	Phase A-B : Découverte et opérations booléennes	45
4.1.2	Phase C1 : Rétro-ingénierie d'objets simples (Séance 6)	45
4.1.3	Phase C2 : Les pièces d'échecs - le point de rupture (Séance 7)	47
4.1.4	Synthèse : confrontation des hypothèses a priori avec les observations	49
4.1.5	Relecture théorique	49
4.2	Analyse a posteriori du Cycle 2 (Groupe 2)	50
4.2.1	L'esquisse en pratique : un constat qui s'impose d'entrée	50
4.2.2	Formes simples : confirmation des prédictions	51
4.2.3	Pièces d'échecs : des résultats inattendus	52
4.2.4	Le cavalier : même blocage, diffusion différente	53
4.2.5	L'abandon de l'esquisse : un résultat en soi	54
4.2.6	Synthèse : cinq constats pour le Cycle 2	54
4.2.7	Relecture Théorique	55
4.3	Analyse comparative Groupe 1 / Groupe 2	55
4.3.1	Formes simples : même résultat, processus différent	56
4.3.2	La tour : le terrain de comparaison le plus riche	56
4.3.3	Le cavalier : même impasse, diffusion différente	57
4.3.4	Le rôle de l'esquisse : un bilan honnête	58
4.3.5	Synthèse comparative	59
5	Apports et limites de la recherche	61
5.1	Apports	61

5.2	Limites	63
6	Conclusion	65
	Bibliographie.....	69
	Annexe 1 - Programme détaillé des séances.....	I
	Annexe 2 : Objets de rétro-ingénierie - formes simples.....	IV
	Annexe 3 : Objets de rétro-ingénierie - Pièces d'échecs	V
	Annexe 4 - Réalisations du groupe 1	VI
	Annexe 5 - Grille d'analyse des traces TinkerCAD - Groupe 1.....	VII
	Annexe 6 - Réalisations du groupe 2	XI
	Annexe 7 - Matrice de croisement esquisses ↔ modélisations - G2.....	XII
	Annexe 8 – Esquisses papier du groupe 2	XIII
	Annexe 9 - Grille d'analyse des esquisses - Groupe 2.....	XXXIV
	Annexe 10 - Grille d'analyse des traces TinkerCAD - Groupe 2.....	XXXVII

Introduction

1.1 Introduction générale

L'intégration des technologies numériques dans l'enseignement obligatoire constitue un enjeu majeur de l'éducation contemporaine (Tejera et al., 2025). En Suisse romande, le Plan d'Etudes Romand (PER) a progressivement intégré les compétences numériques, d'abord à travers l'axe MITIC (Médias, Images et Technologies de l'Information et de la Communication) de la formation générale, puis suite à l'adoption du *Plan d'action en faveur de l'éducation numérique* en 2018, à travers le nouveau domaine disciplinaire « Education numérique ».

Parallèlement à ces évolutions du plan d'études, les établissements scolaires s'équipent (ou souhaitent s'équiper) progressivement d'outils de fabrication numérique, comme les imprimantes 3D. Ces technologies ouvrent de nouvelles perspectives pédagogiques, à la croisée des chemins entre numérique et conception technique. La modélisation 3D et l'impression 3D sont devenues des compétences recherchées dans de nombreux secteurs professionnels : ingénierie, architecture, design, médecine, artisanat ou encore industrie manufacturière. Former les élèves à ces technologies dès le secondaire s'inscrit dans une logique d'orientation et de préparation au monde professionnel actuel.

Cependant, peu d'enseignants disposent d'une formation spécifique ou d'une expérience en modélisation 3D et en impression 3D. Les ressources pédagogiques au niveau secondaire I demeurent rares, et les pratiques d'enseignement dans ce domaine sont encore émergentes (Tejera et al., 2025). Cela crée un certain décalage entre l'intérêt institutionnel pour ces technologies et les capacités à les intégrer de manière structurée et efficace dans le cursus pédagogique.

C'est dans ce contexte qu'a émergé un projet pilote de cours facultatif en modélisation et impression 3D au Collège Thurmann, à Porrentruy, dans le canton du Jura. Ce mémoire se propose de documenter, d'analyser et de formaliser l'expérience de mise en œuvre de ce cours afin de contribuer au développement de pratiques pédagogiques efficaces dans ce domaine émergent.

Ce mémoire documente et analyse un projet pilote mené au Collège Thurmann : un cours facultatif de modélisation et impression 3D destiné à des élèves du secondaire I sans expérience préalable. La recherche se focalise sur une compétence cognitive centrale mais largement implicite dans l'enseignement de la modélisation 3D, la capacité de décomposition

géométrique. Il s'agit de l'aptitude à analyser mentalement des formes complexes en primitives géométriques simples (cubes, cylindres, sphères) manipulables dans un logiciel de modélisation de type CSG (Constructive Solid Geometry).

L'approche méthodologique relève de l'ingénierie didactique. Je conçois, teste et analyse un dispositif d'enseignement structuré en deux cycles successifs auprès de deux groupes d'élèves. Le premier cycle (Groupe 1, automne 2025) permet d'observer les stratégies spontanées des élèves novices et d'identifier leurs obstacles. Le second cycle (Groupe 2, printemps 2026) teste l'effet d'une médiation cognitive spécifique, l'esquisse papier préalable, pour faciliter le développement de cette compétence. Cette démarche itérative vise à produire des connaissances didactiques utilisables pour d'autres enseignants souhaitant intégrer la modélisation 3D au secondaire I.

1.2 Contextualisation

1.2.1 Le Plan d'Etudes Romand et l'éducation numérique

Le Plan d'Etudes Romand (PER) constitue le document de référence pour la scolarité obligatoire dans les cantons francophones ou bilingues de Suisse. Adopté en 2010, il définit les objectifs d'enseignement communs organisés autour de domaines disciplinaires, de capacités transversales et de formation générale.

Les compétences numériques, initialement MITIC, étaient intégrées de manière transversale dans la Formation générale. Cette approche reconnaissait l'importance des technologies, mais leur conférait un statut transversal plutôt que disciplinaire.

En 2024, une évolution majeure a transformé ce paysage avec l'introduction de l'Education Numérique (EN) comme nouveau domaine disciplinaire à part entière. Cette mise à jour structure l'EN autour de trois axes interdépendants :

- **Médias** : comprendre, analyser et produire des contenus médiatiques.
- **Sciences informatiques** : développer la pensée computationnelle, comprendre les concepts informatiques de base et maîtriser la conception numérique.
- **Usages** : utiliser les outils numériques de manière efficace et éthique dans des contextes variés, y compris pour des projets de créations.

Cette formalisation accrue des compétences numériques crée un cadre institutionnel favorable à l'intégration de la modélisation 3D et de la fabrication numérique, ces activités s'inscrivant

naturellement dans l'axe « **Sciences informatiques** » (conception, pensée computationnelle) et l'axe « **Usages** » (projets créatifs avec des outils numériques).

1.2.2 La fabrication numérique dans le paysage éducatif romand

Comme le souligne une étude de l'IREM sur la modélisation dans l'enseignement des mathématiques en Suisse romande, cette compétence est apparue dans le PER comme un thème fédérateur et transversal en mathématiques et en sciences (Burgermeister & Dorier, 2013). La modélisation 3D s'inscrit dans cette continuité, étendant la compétence de modélisation au domaine technique et à la représentation spatiale.

Cependant, malgré cet intérêt des institutions, l'intégration de la fabrication numérique (modélisation 3D et impression 3D) dans les établissements scolaires romands reste hétérogène et largement dépendante d'initiatives locales. Les établissements qui s'équipent d'imprimantes 3D font souvent face à un défi pédagogique : comment exploiter ces outils de manière structurée et efficace, en accord avec les objectifs du PER, plutôt que de les utiliser de manière ponctuelle ou anecdotique ? De nombreux témoignages rapportent que ces imprimantes 3D finissent souvent « au fond d'un placard », faute de trouver une utilisation concrète et régulière au sein des établissements.

1.3 Contexte cantonal : le canton du Jura

1.3.1 Vision institutionnelle

Le Service de l'enseignement (SEN) du canton du Jura manifeste un intérêt pour l'intégration des technologies de fabrication numérique dans les établissements scolaires. Le SEN a identifié la modélisation 3D et l'impression 3D comme des compétences alignées avec une « logique professionnelle pour le futur des élèves ».

Cette vision s'inscrit dans une double perspective :

- **Développement des compétences numériques** : répondre aux exigences du nouveau domaine EN du PER en offrant aux élèves des expériences pratiques de conception et de création avec des outils numériques.
- **Préparation professionnelle** : familiariser les élèves avec des outils utilisés dans de nombreux métiers techniques, d'ingénierie et de conception, contribuant ainsi à leur orientation et à leur employabilité future.

Cette double perspective positionne la modélisation 3D non comme un simple enrichissement, mais comme une composante stratégique de la formation des élèves du secondaire I.

1.3.2 Le projet pilote au Collège Thurmann

Face à cet intérêt institutionnel et à l'absence de ressources pédagogiques structurées, le SEN a accueilli favorablement la proposition de mise en place d'un cours facultatif de modélisation et impression 3D au collège Thurmann. Ce projet pilote vise à :

- Expérimenter l'enseignement de la modélisation 3D auprès d'élèves du secondaire I
- Observer l'engagement et les apprentissages des élèves dans ce domaine
- Documenter les pratiques pédagogiques efficaces
- Evaluer la faisabilité d'une intégration future de ce type de cours dans le cursus régulier

Le caractère pilote de ce projet implique une dimension d'exploration et de recherche. Il s'agit non seulement d'enseigner, mais aussi de documenter l'expérience afin qu'elle puisse être transférée et reproduite dans d'autres établissements.

1.4 Contexte spécifique du cours facultatif de modélisation et impression 3D

1.4.1 L'établissement : Collège Thurmann

Le collège Thurmann, situé à Porrentruy, est un établissement du secondaire I accueillant environ 350 élèves. L'établissement dessert une population scolaire urbaine et péri-urbaine.

L'établissement dispose de plusieurs salles informatiques équipées de PC fixes, dont l'une d'elle dispose d'une annexe où deux imprimantes 3D sont installées. Cette séparation de l'espace de conception numérique (salle informatique) de l'espace de fabrication (annexe avec imprimantes 3D) reflète bien la chaîne complète du processus de fabrication numérique : concevoir, modéliser, puis matérialiser.

1.4.2 Structure du cours

Le cours facultatif de modélisation et d'impression 3D se présente comme suit :

Format et durée

- 1 période de 45 minutes par semaine
- Durée : année scolaire complète (septembre à juin)
- Horaire : dernière période de la journée (16h à 16h45)

Public

- 23 élèves inscrits au total
- Niveaux : 9^{ème} et 10^{ème} Harmos (aucun élève de 11^{ème})
- Composition : 10 filles et 13 garçons

- Répartition : deux groupes successifs (Groupe 1 au 1^{er} semestre, Groupe 2 au 2^{ème} semestre) pour des raisons d'encadrement pratique

Prérequis

- Aucune expérience préalable en modélisation 3D
- Cours accessible à tous les élèves sans sélection

Infrastructure technique

- Logiciels : TinkerCAD (niveau débutant) puis OnShape (niveau avancé)
(Bien que le cursus complet inclue OnShape, cette étude se focalise exclusivement sur la phase d'initiation avec TinkerCAD.)
- Environnement : PC fixes en salle informatique

Projet final

- Création d'une enseigne lumineuse personnalisée
- Intégration de composants électroniques (LED)
- Projet authentique et motivant

1.4.3 Profil de l'enseignant

Je présente un profil particulier qui mérite d'être explicité, car il influence nécessairement l'approche pédagogique et la nature du cours :

- Formation initiale : ingénieur spécialisé en conception de produit, conception ergonomique et design
- Expérience professionnelle : plusieurs années à son compte en tant que concepteur, puis dans une entreprise en tant qu'ingénieur prototype, avec pratique intensive de la modélisation 3D et de l'impression 3D (SLA et FDM)
- Reconversion : enseignant sciences de la nature et éducation numérique au secondaire I
- Expertise technique : maîtrise avancée des logiciels de CAO et des processus de fabrication numérique

Ce double profil (expert technique et enseignant au secondaire) constitue à la fois un atout et une spécificité du projet. D'une part, il permet une compréhension approfondie des enjeux techniques et des meilleures pratiques professionnelles en modélisation 3D. D'autre part, il soulève la question de la transférabilité des pratiques pédagogiques développées vers des enseignants ne disposant pas de cette expertise technique préalable.

1.4.4 Motivation des élèves

Les inscriptions au cours facultatif suggèrent plusieurs facteurs de motivation :

- **Le projet final concret** : la perspective de créer une enseigne lumineuse personnalisée, qui est un objet tangible, fonctionnel et « cool », semble constituer un facteur d'attraction important.
- **La curiosité technologique** : l'impression 3D, technologie relativement récente et médiatisée (réseaux sociaux, vidéos, etc.), suscite un intérêt chez de nombreux adolescents.
- **La dimension créative** : la possibilité de concevoir et matérialiser ses propres idées offre une liberté créative attractive.
- **L'absence de prérequis** : contrairement à d'autres cours facultatifs techniques qui peuvent sembler intimidants, celui-ci est explicitement ouvert aux débutants.

La composition équilibrée du groupe (10 filles, 13 garçons) est également notable, suggérant que le cours n'est pas perçu comme exclusivement « technique » ou « masculin », contrairement à certains stéréotypes associés aux disciplines d'ingénierie.

2 Cadre théorique, problématique et question de recherche

2.1 Contexte développemental et éducatif

2.1.1 Une fenêtre développementale propice (11-15 ans)

Des recherches récentes confirment que la tranche d'âge 11-15 ans constitue une période particulièrement propice pour développer les compétences spatiales via la modélisation 3D. Une étude menée auprès de plus de 500 élèves du secondaire (Teplá et al., 2022) montre que l'utilisation de modèles 3D améliore significativement la motivation et les résultats d'apprentissage, avec les effets les plus marqués pour les élèves de 11 à 13 ans.

Ces constats sont confirmés par une étude slovène auprès d'élèves de 11-14 ans (Šafhalter et al., 2022) : après 30 heures de formation sur SketchUp, tous les élèves ont progressé significativement en visualisation spatiale, quel que soit leur niveau initial.

Ces résultats résonnent directement avec mon expérience d'ingénieur. La visualisation spatiale et la décomposition géométrique constituent des compétences fondamentales en conception de produits. Observer comment des élèves de 12-15 ans développent naturellement ces compétences avec des outils numériques représente une opportunité unique de documenter un apprentissage technique à un âge critique de développement cognitif.

2.2 Fondements cognitifs de la modélisation 3D

Cette section examine les processus mentaux sollicités lors de l'apprentissage de la modélisation 3D, en s'appuyant sur les cadres théoriques établis en didactique de la géométrie et en psychologie cognitive.

2.2.1 La pensée spatiale et ses composantes

La modélisation 3D sollicite en premier lieu la pensée spatiale, c'est-à-dire la capacité à construire et manipuler mentalement des représentations d'objets tridimensionnels (Clements & Battista, 1992). Cette compétence se développe progressivement tout au long de la scolarité, avec des phases d'accélération identifiables entre 10 et 15 ans.

La recherche distingue deux composantes principales de la pensée spatiale particulièrement sollicitées en modélisation 3D :

- **La rotation mentale** : C'est la capacité à manipuler mentalement des objets 3D, à les faire pivoter dans son esprit et à prévoir leur apparence sous différents angles. Cette compétence est essentielle pour comprendre comment les primitives géométriques s'assemblent dans l'espace virtuel et pour anticiper le résultat d'opérations booléennes.
- **La visualisation spatiale** : C'est la capacité à imaginer, représenter et transformer des structures spatiales complexes, à anticiper les conséquences de modifications géométriques. Elle permet à l'élève de « voir mentalement » comment une forme complexe peut être décomposée en primitives plus simples.

Une étude récente auprès de plus de 1300 élèves de 10-15 ans (Fujita et al., 2020) confirme ce que j'observe régulièrement dans mon enseignement : la visualisation seule ne suffit pas. Les élèves doivent également développer un raisonnement analytique pour identifier les propriétés géométriques (parallélisme, angles, symétries) nécessaires à la décomposition.

2.2.2 Les niveaux de raisonnement géométrique selon van Hiele

Pour comprendre comment les élèves progressent dans leur capacité à analyser et manipuler des formes complexes, le modèle van Hiele offre un cadre théorique intéressant. Développé dans les années 1950, le modèle van Hiele décrit une progression en cinq niveaux de raisonnement géométrique (Braconne-Michoux, 2014).

Les trois premiers niveaux du modèle van Hiele sont particulièrement pertinents pour comprendre l'apprentissage de la modélisation 3D :

- **Niveau 1 – Visualisation (reconnaissance visuelle holistique)** : L'élève reconnaît et identifie les formes géométriques par leur apparence globale, sans analyser leurs propriétés. Un cube est reconnu comme « un cube » parce qu'il « ressemble à un cube », sans considération explicite de ses faces carrées, de ses arêtes perpendiculaires ou de ses angles droits. A ce niveau, la forme est perçue comme un tout.
- **Niveau 2 – Analyse (identification des propriétés)** : L'élève commence à identifier et à analyser les propriétés des formes géométriques. Le cube n'est plus seulement une forme reconnaissable visuellement, mais un objet possédant six faces, douze arêtes de même longueur et huit sommets. C'est à ce niveau que devient possible l'analyse structurelle des formes. L'élève peut percevoir une forme complexe comme possédant des caractéristiques géométriques identifiables et analysables.

- **Niveau 3 – Déduction informelle (compréhension des relations) :** L'élève comprend les relations entre les propriétés et commence à développer des raisonnements logiques simples sur les formes géométriques.

La transition du niveau 1 au niveau 2 constitue un seuil cognitif fondamental pour la maîtrise de la modélisation 3D. Tant que l'élève reste au niveau de la reconnaissance visuelle holistique, il peine à analyser la structure interne des objets qu'il souhaite modéliser. Cette transition ne se produit pas spontanément et nécessite un enseignement structuré accompagné de situations didactiques appropriées. Ce modèle constitue une grille de lecture pour analyser la progression des élèves novices. En observant leurs stratégies de décomposition et leurs verbalisations, il sera possible d'identifier s'ils restent au niveau 1 (reconnaissance holistique) ou accèdent au niveau 2 (analyse des propriétés géométriques).

2.2.3 De l'holistique à l'analytique

La modélisation 3D exige que l'élève effectue une transformation mentale fondamentale : passer d'une perception holistique (voir l'objet comme un tout indivisible) à une perception analytique (identifier la structure géométrique qui le constitue).

Dans le contexte francophone, (Duval, 2005) apporte un éclairage essentiel sur cette transition. Il identifie trois processus cognitifs interdépendants nécessaires pour manipuler efficacement des objets géométriques :

- **La visualisation :** reconnaissance des formes et de leurs configurations spatiales
- **L'analyse :** identification des propriétés géométriques et des relations entre éléments
- **La construction :** création stratégique de représentations selon un plan

La difficulté principale pour les élèves réside dans la coordination de ces trois processus, qui sont souvent enseignés de manière isolée. La modélisation 3D offre précisément un contexte authentique où ces trois processus doivent être mobilisés simultanément. L'élève doit visualiser l'objet cible, analyser sa structure géométrique, puis construire stratégiquement sa représentation numérique.

Ces cadres théoriques suggèrent que l'enseignement de la modélisation 3D ne peut se limiter à la transmission de compétences techniques (maîtrise du logiciel). Il doit également viser explicitement le développement du raisonnement géométrique analytique et la coordination des processus de visualisation, d'analyse et de construction. La question se pose alors : quels

dispositifs didactiques peuvent faciliter cette transition cognitive de l'holistique à l'analytique chez des élèves novices du secondaire I ?

2.3 La décomposition en primitives géométriques

L'approche utilisée dans TinkerCAD s'appelle CSG (Constructive Solid Geometry). Ce paradigme de modélisation, développé initialement dans les années 1970 pour la conception assistée par ordinateur, repose sur un principe fondamental : toute forme complexe peut être décomposée en volumes géométriques simples appelés « primitives » (cubes, cylindres, sphères, cônes), puis reconstruite par combinaison de ces primitives via des opérations booléennes (union, soustraction, intersection).

Cette approche est particulièrement adaptée à l'enseignement pour des débutants : elle est intuitive (on « voit » les volumes qui composent un objet), accessible techniquement (pas de dessin 2D requis), et permet des résultats rapides et motivants. Cependant, elle sollicite une capacité cognitive centrale qui constitue le cœur de cette recherche : la capacité à décomposer mentalement une forme complexe en ses composants géométriques élémentaires.

Cette compétence de décomposition est au cœur de l'expertise en modélisation 3D. Dans mon expérience d'ingénieur en conception de produits, j'ai observé que les experts « voient » instantanément comment décomposer un objet complexe, tandis que les novices restent bloqués par une vision holistique. Cette différence ne relève pas de la maîtrise technique du logiciel, mais d'une capacité cognitive spécifique à analyser la structure géométrique des formes.

2.3.1 Processus cognitifs mobilisés

La décomposition en primitives sollicite plusieurs processus mentaux interdépendants, déjà présentés dans les sections précédentes :

- **Analyse visuelle** : identifier mentalement les volumes élémentaires qui composent l'objet (en lien avec la rotation mentale et la visualisation spatiale, section 2.2.1)
- **Sélection stratégique** : choisir les primitives appropriées parmi le répertoire limité du logiciel
- **Planification procédurale** : déterminer l'ordre d'assemblage et anticiper le résultat des opérations booléennes

Comme l'ont démontré (Ng & Ye, 2022), cette « déconstruction cognitive » permet aux élèves de construire des modèles 3D en décomposant mentalement les solides en parties élémentaires de différentes dimensions, exactement ce que requiert une modélisation CSG efficace.

2.3.2 Limites de l'approche par primitives volumiques et stratégies alternatives

L'approche CSG, bien qu'intuitive pour des débutants, ne convient pas également bien à tous les types d'objets. Dans ma pratique professionnelle, j'ai constaté une distinction fondamentale entre deux catégories :

- **Les objets « faciles »** : Une table (plateau + pieds cylindriques), une maison (murs + toit triangulaire), un porte-clés personnalisé. Ces objets présentent une géométrie clairement décomposable en volumes simples assemblés. L'élève peut « voir » directement les primitives constitutives.
- **Les objets « résistants »** : Un vase, une bouteille, certaines pièces d'échecs, des éléments organiques ou courbes. Pour ces formes, tenter d'assembler des volumes produit un résultat approximatif, « pixellisé », peu satisfaisant. La difficulté ne vient pas d'un manque de maîtrise du logiciel, mais d'une inadéquation entre la stratégie volumique et la morphologie de l'objet.

Face à ces limites, les logiciels professionnels de CAO proposent une approche alternative appelée B-Rep (Boundary Representation) : plutôt que d'assembler des volumes 3D, l'utilisateur dessine d'abord un profil 2D (une silhouette plane), puis génère le volume par extrusion ou révolution. Cette stratégie implique un changement de registre cognitif majeur : ne plus se demander « quels volumes composent cet objet ? » mais « quel profil 2D, une fois extrudé, engendre cet objet 3D ? ». C'est d'ailleurs cette méthode de modélisation qui est la plus utilisée dans le monde professionnel.

2.3.3 Un savoir largement implicite dans l'enseignement

Malgré son caractère fondamental, la compétence de décomposition géométrique demeure largement implicite dans l'enseignement de la modélisation 3D. Cette situation révèle une problématique plus large : comment transmettre une expertise qui repose sur des processus mentaux automatisés et difficilement verbalisables ?

Dans mon expérience d'ingénieur devenu enseignant, j'ai découvert cette difficulté : ce qui me semble évident lorsque j'analyse un objet (identifier instantanément s'il se décompose en volumes ou nécessite une approche par profil) est en réalité le fruit d'années de pratique. Lorsque

je dois expliciter ce processus à des élèves novices, je réalise à quel point mon raisonnement est devenu inconscient et automatique.

Cette difficulté de transmission renvoie directement au concept de savoir tacite que nous examinerons dans la section suivante, et soulève une question didactique cruciale : comment accompagner des élèves novices dans la construction d'une compétence qui, chez l'expert, est devenue largement intuitive ?

2.4 Les savoirs tacites en conception CAO

Dans ma pratique professionnelle précédente, j'ai souvent observé ce paradoxe : les experts en modélisation CAO maîtrisent des stratégies complexes de décomposition géométrique, mais peinent à expliquer explicitement comment ils procèdent. Confronté à un objet à modéliser, je « vois » instantanément la stratégie appropriée, mais lorsque je dois enseigner cette compétence à mes élèves, je réalise à quel point mon raisonnement est devenu automatique et difficile à verbaliser. Cette difficulté révèle la nature largement tacite de l'expertise en modélisation 3D.

2.4.1 Command Knowledge vs Strategic Knowledge

Chester (2007) propose une distinction éclairante pour comprendre l'apprentissage de la CAO. Il identifie deux types de connaissances nécessaires :

- **Command Knowledge** (connaissance des commandes) : maîtrise procédurale du logiciel. Savoir où cliquer, comment redimensionner un cube, activer une opération booléenne. C'est une connaissance explicite, facilement transmissible par démonstration.
- **Strategic Knowledge** (connaissance stratégique) : savoir pourquoi choisir telle primitive, comment planifier l'ordre des opérations, comment anticiper les problèmes. Cette connaissance est largement implicite et ne se transmet pas par simple instruction technique.

La recherche de Chester démontre que la connaissance stratégique est significativement plus efficace que la connaissance des commandes pour développer l'expertise en CAO. Ce résultat éclaire directement ce mémoire : la décomposition en primitives relève clairement de la Strategic Knowledge, une compétence qui ne peut s'enseigner par simple démonstration des fonctions du logiciel. Cette distinction Command Knowledge/Strategic Knowledge constitue une grille d'analyse pour interpréter les comportements d'élèves novices. Elle permet de différencier les blocages d'ordre technique (ne pas savoir utiliser un outil) des blocages d'ordre stratégique (ne

pas savoir quand utiliser un outil). Cette distinction sera mobilisée pour analyser les traces de modélisation et les demandes d'aide des élèves.

2.4.2 Du novice à l'expert : une progression par l'expérience

Le philosophe Michael (Polanyi, 2012) a conceptualisé cette dimension de l'expertise sous le terme de savoir tacite : « nous pouvons savoir plus que nous ne pouvons dire ». Le modèle de (Dreyfus & Dreyfus, 1988) décrit comment cette expertise se construit progressivement : les novices s'appuient sur le suivi rigoureux de règles explicites, tandis que les experts développent une performance intuitive basée sur la reconnaissance de patterns et l'expérience incorporée.

Ce passage de novice à expert nécessite une exposition répétée à des situations réelles de résolution de problèmes, exactement ce que je propose avec le cours de modélisation 3D au Collège Thurmann. Mais comment accélérer cette construction chez des élèves qui n'ont que 45 minutes hebdomadaires sur une année scolaire ?

2.4.3 Enjeux pour l'enseignement

Ces découvertes ont des implications directes pour l'enseignement au secondaire I. Si l'expertise repose sur des connaissances stratégiques tacites plutôt que sur la simple maîtrise technique, alors la pédagogie doit créer des conditions permettant aux élèves de construire progressivement ces connaissances tacites.

La question devient donc : quels dispositifs didactiques peuvent faciliter l'émergence de ces connaissances stratégiques chez des élèves novices ? Comment rendre explicite et enseignable ce qui, chez l'expert, est devenu largement inconscient ? C'est précisément à cette question que tente de répondre l'introduction de différentes formes de médiation cognitive, que nous examinerons dans la section suivante.

2.5 Médiation cognitive pour l'apprentissage de la décomposition géométrique

Face à la charge cognitive importante que représente la modélisation 3D pour des novices (section 2.2) et à la nature tacite des savoirs stratégiques à acquérir (section 2.4), l'enseignement ne peut se limiter à une instruction directe des commandes du logiciel. Il est nécessaire d'introduire ce que (Bruner, 1997) nomme des processus d'étayage (scaffolding). Ce sont des supports temporaires qui prennent en charge une partie de la complexité de la tâche, permettant aux élèves de se concentrer sur l'essentiel, la stratégie de construction.

Dans le contexte spécifique de la conception d'objets, cet étayage passe souvent par l'utilisation d'artefacts de médiation, c'est-à-dire d'outils externes qui aident à penser.

2.5.1 Externaliser la pensée

Dans ma pratique professionnelle de concepteur, j'ai pu constater que la résolution d'un problème de forme ne se fait jamais uniquement « dans la tête ». Elle passe par une externalisation : on manipule, on trace, on note. Pour l'élève novice, cette externalisation est d'autant plus cruciale que sa mémoire de travail est saturée par la découverte de l'interface logicielle. Plusieurs types de médiations peuvent faciliter cette externalisation :

- **La verbalisation explicite** : Demander à l'élève d'expliquer son intention avant d'agir. Si elle est efficace pour la métacognition, elle reste difficile à mettre en œuvre simultanément pour une classe entière. Dans ma pratique d'enseignant, j'ai observé que certains élèves verbalisent naturellement leur démarche, tandis que d'autres restent silencieux, et ce sont souvent ces derniers qui se bloquent.
- **La manipulation physique** : L'usage de cubes, de pâte à modeler ou de jeux de construction. Cette approche a l'avantage de rendre tangibles les opérations d'union ou de soustraction, mais manque souvent de la précision géométrique requise pour la CAO.
- **Le travail collaboratif** : Travailler en binômes où un élève verbalise pendant que l'autre manipule. Cette approche combine dialogue et action, mais nécessite une organisation spécifique de la classe.
- **La représentation graphique (le dessin)** : C'est l'outil traditionnel de l'ingénieur et de l'architecte, qui mérite une attention particulière.

2.5.2 L'esquisse comme outil de structuration de la pensée

Contrairement à une idée reçue fréquente chez les élèves, le dessin en conception n'a pas pour but premier de « faire joli » ou de communiquer une idée finie à autrui, mais de dialoguer avec soi-même pour structurer sa pensée. Les recherches en cognition du design (Goldschmidt, 1991) montrent que l'esquisse n'est pas un simple outil de représentation mais un support actif de la réflexion : en dessinant, on explore différentes possibilités, on teste des hypothèses d'assemblage.

Selon cette approche, l'esquisse remplit deux fonctions cognitives essentielles pour la décomposition géométrique :

- **Une fonction de filtrage** : En passant de l'objet mental 3D à une représentation 2D sur papier, l'élève est obligé de simplifier. Il doit choisir une vue, ignorer les détails superflus et se concentrer sur les contours structurants. C'est un premier pas vers l'abstraction géométrique.

- **Une fonction de test** : L'esquisse permet de tester rapidement des hypothèses d'assemblage (telle forme va-t-elle sur telle autre ?) sans le coût temporel de la modélisation informatique. Dans ma pratique d'ingénieur, je dessine toujours une esquisse rapide avant de modéliser, cela me fait gagner un temps considérable en évitant les fausses pistes, et me permet de fixer des proportions rapidement.

Pour un élève novice confronté à TinkerCAD, le passage par le papier pourrait donc théoriquement agir comme un sas de décompression cognitive, favorisant le passage d'une vision holistique à une vision analytique (identifié comme obstacle majeur en section 2.2.3).

Toutefois, il reste à vérifier si cet outil, naturel pour l'expert, peut être approprié efficacement par des élèves de 12-15 ans sans culture technique préalable, et s'il aide réellement à la décomposition en primitives volumiques dans un environnement CSG. C'est précisément cette question que permet d'explorer la structure en deux groupes de mon cours au Collège Thurmann. Observer d'abord les stratégies spontanées du Groupe 1, puis tester l'effet de l'introduction de l'esquisse avec le Groupe 2.

2.6 TinkerCAD comme environnement d'observation

TinkerCAD est un logiciel de modélisation 3D en ligne développé par Autodesk, conçu spécifiquement pour l'éducation et les débutants. Son approche repose entièrement sur le principe de CSG, ce qui en fait un outil particulièrement adapté pour observer et analyser le processus de décomposition en primitives géométriques.

- Accessibilité et simplicité
 - o Interface intuitive adaptée aux élèves du secondaire I
 - o Gratuit et accessible en ligne (pas d'installation requise)
 - o Bibliothèque de primitives claire et limitée (cube, cylindre, sphère, etc.)
- Visibilité du processus de construction
 - o Historique des opérations visible et modifiable
 - o Opérations booléennes explicites (grouper/soustraire)
- Pertinence pour l'observation pédagogique
 - o Les stratégies de décomposition sont traçables dans les fichiers
 - o Les erreurs et blocages sont identifiables
 - o Les ajustements et itérations sont documentés automatiquement
- Limites assumées
 - o Fonctionnalités limitées par rapport aux logiciels professionnels

- o Contraintes techniques qui peuvent influencer les stratégies de décomposition
- o Vocabulaire géométrique restreint (nombre limité de primitives)

Ces limites, plutôt que de constituer un obstacle, peuvent être considérées comme un cadre structurant qui aide les élèves novices à se concentrer sur l'essentiel : la décomposition stratégique des formes en primitives simples.

2.7 Problématique

L'intégration de la modélisation 3D au secondaire I se heurte à un obstacle didactique majeur. Si les élèves s'approprient rapidement l'interface des logiciels (Command Knowledge), la capacité à décomposer mentalement des formes complexes en primitives géométriques (Strategic Knowledge) ne va pas de soi. Comme nous l'avons vu, cette compétence experte reste largement tacite (section 2.4) et nécessite une transition cognitive difficile de la vision holistique vers la vision analytique (section 2.2.3).

On observe ici un cercle vicieux didactique : pour modéliser efficacement avec TinkerCAD (approche CSG), les élèves doivent déjà posséder une capacité de décomposition géométrique qu'ils n'ont justement pas encore développée. Sans étayage spécifique, ils risquent de se limiter à des stratégies d'empilement inefficaces ou de se décourager face à des formes complexes.

La littérature suggère que l'introduction d'artefacts de médiation, notamment l'esquisse (section 2.5), pourrait soutenir cet apprentissage. Mais avant de prescrire une solution didactique, il est nécessaire de comprendre finement comment les élèves novices abordent spontanément cette tâche et où se situent leurs blocages.

Le projet pilote du Collège Thurmann offre une opportunité unique d'explorer ces questions dans une démarche itérative en deux temps : d'abord diagnostiquer les stratégies spontanées des élèves (Groupe 1, pour rendre visible le processus d'apprentissage), puis tester l'efficacité d'une médiation par l'esquisse (Groupe 2, pour franchir les obstacles identifiés).

2.8 Question(s) de recherche

Cette recherche adopte une démarche itérative qui se traduit par deux phases complémentaires, chacune guidée par des questions spécifiques.

2.8.1 Phase 1 : Diagnostique (Groupe 1 – Automne 2025)

Question de recherche 1 :

Comment se construit la capacité de décomposition de formes complexes en primitives géométriques chez des élèves novices du secondaire I lors de l'apprentissage de la modélisation 3D avec TinkerCAD ?

Sous-questions :

- Quelles stratégies de modélisation (additives, soustractives, mixtes) les élèves privilégient-ils intuitivement ?
- Quels obstacles conceptuels ou procéduraux (gestion des vides, alignements, choix des primitives) émergent en l'absence de consignes de planification ?
- Comment leur maîtrise de la décomposition évolue-t-elle au fil du premier semestre ?

2.8.2 Phase 2 : Intervention (Groupe 2 – Printemps 2026)

Suite au diagnostic du groupe 1 et en s'appuyant sur les fonctions cognitives de l'esquisse définie en section 2.5.2, j'introduis une variable didactique : l'esquisse papier préalable.

Question de recherche 2 :

Dans quelle mesure l'introduction d'une esquisse papier préalable facilite-t-elle le développement de la compétence de décomposition géométrique par rapport à une approche de modélisation directe ?

Sous-questions :

- L'esquisse permet-elle de modifier les stratégies de modélisation observées chez le Groupe 1 (réduction des essais-erreurs, meilleure planification) ?
- Comment s'opère le transfert des informations géométriques du dessin 2D vers l'espace 3D de TinkerCAD ?
- Quels indicateurs permettent d'identifier une progression différenciée entre les deux groupes ?

2.9 Synthèse du cadre théorique : outils conceptuels pour l'analyse

Les concepts mobilisés dans ce chapitre constituent une « boîte à outils » pour analyser les apprentissages des élèves en modélisation 3D :

- Le modèle van Hiele me permettra d'identifier à quel niveau de raisonnement géométrique se situent les élèves
- La distinction CSG vs B-Rep expliquera pourquoi certains objets résistent aux stratégies additives
- Le cadre de Chester (Command Knowledge vs Strategic Knowledge) éclairera les blocages observés malgré la maîtrise technique
- Les fonctions cognitives de l'esquisse justifieront son introduction comme médiation au cycle 2

Ces outils conceptuels guideront l'analyse à priori (Chapitre 3) puis l'interprétation des données empiriques (Chapitre 4).

3 Démarche méthodologique

3.1 Choix méthodologique : Une ingénierie didactique en deux cycles

Pour répondre à mes questions de recherche sur le rôle de l'esquisse dans l'apprentissage de la décomposition géométrique, j'ai choisi la méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). Contrairement à une simple observation de classe, cette approche implique de concevoir, réaliser et analyser des séquences d'enseignement spécifiques pour provoquer et étudier des phénomènes d'apprentissage précis.

Le fait de disposer de deux cohortes successives d'élèves m'a permis de structurer ma recherche en deux cycles d'ingénierie articulés :

1. **Cycle 1 (Groupe 1 - Automne 2025)** : Une première ingénierie menée sans médiation par l'esquisse. L'objectif est de faire émerger les stratégies spontanées de décomposition et identifier les obstacles épistémologiques réels. Ce cycle répond à ma première question de recherche et sert d'état de référence pour la comparaison.
2. **Cycle 2 (Groupe 2 - Printemps 2026)** : Sur la base de l'analyse du premier cycle, j'introduis une nouvelle variable didactique : l'esquisse papier préalable. L'objectif : tester si cette médiation permet de surmonter les obstacles identifiés au Cycle 1. Ce cycle répond à ma seconde question de recherche.

Cette approche comparative me permet d'isoler l'effet de la variable "esquisse" sur le développement des compétences de décomposition, en maintenant constants tous les autres paramètres (tâches, outils, durée).

3.2 Cycle 1 : Ingénierie diagnostique (Groupe 1)

Ce premier cycle vise à répondre à la question : « Comment se construit la capacité de décomposition géométrique chez des élèves novices ? » Il s'appuie sur un cycle d'initiation de 7 séances réalisées entre septembre et novembre 2025.

3.2.1 Le dispositif didactique global

Le contexte

- 23 élèves de 9^{ème} et 10^{ème} années (12-15 ans), tous novices en modélisation 3D
- Equipement : PC fixes, logiciel TinkerCAD
- Format : 7 séances de 45 minutes, à raison d'une séance par semaine

Les variables macro-didactiques :

J'ai défini deux variables majeures pour structurer ce premier cycle :

1. **La progression pédagogique** : du guidage strict (tutoriel, reproduction pas-à-pas) vers l'autonomie complète (rétro-ingénierie d'objets physiques).
2. **L'absence d'outil de planification (variable de commande principale)** : J'ai fait le choix délibéré de ne pas imposer d'esquisse ni de phase de planification papier. Les élèves accèdent directement au logiciel. Cette décision permet d'observer leurs stratégies naturelles lorsque le milieu (logiciel + tâche) interagit directement avec eux, sans médiation externe.

Les variables micro-didactiques :

Le tableau ci-dessous résume l'évolution du degré d'autonomie au fil des séances :

Tableau 1 - Variables micro-didactiques Cycle 1

Phase	Séances	Tâche	Degré d'autonomie
A. Découverte	S1-S2	Tutoriel & Porte-Clés	Aucun (reproduction, guidée)
B. Manipulation	S3-S5	Dé & Dé truqué	Partiel (objet imposé, liberté dans les opérations)
C. Diagnostic	S6	Objets simples imprimés	Total (consigne libre)
D. Rupture	S7	Cavalier d'échecs	Total (objet complexe)

Tableau : Progression des séances du Groupe 1 (Automne 2025)

Tableau 2 - Séances du Groupe 1

Séance	Date	Contenu principal	Type d'activité	Compétence visée	Objet produit
S1	02/09	Premier contact TinkerCAD	Tutoriel intégré au logiciel	Navigation dans l'interface	-
S2	09/09	Porte-clé personnalisé	Reproduction guidée pas-à-pas (démonstration au beamer)	Manipulation de primitives simples (cube, cylindre, texte 3D)	Porte-clé avec prénom
S3	16/09	Dé à jouer (6 faces)	Assemblage semi-guidé (élément fournis à positionner)	Alignement spatial et positionnement précis	Dé standard
S4	23/09	Dé truqué avec cavité	Création autonome avec soustraction	Opération booléenne (perçage) et concept de vide	Dé avec trou interne
S5	30/09	Finalisation & exploration	Libre (découverte MakerWorld)	Inspiration et différenciation	-
-	07/10	Vacances scolaires d'automne			
-	14/10	Vacances scolaires d'automne			
S6	21/10	Rétro-ingénierie d'objets simples	Reproduction autonome d'objets physiques imprimés	Décomposition additive de formes géométriques	5 objets au choix
S7	28/10	Pièces d'échecs (pion, tour, cavalier, fou, reine, roi)	Reproduction autonome d'objets complexes	Test du plafond méthodologique : formes organiques vs CSG	Pièces d'échecs

Le programme détaillé de chaque séance (objectifs, consignes exactes, matériel utilisé) est disponible en Annexe 1.

Note méthodologique : Distinction terminologique essentielle

Cette recherche mobilise le concept d'esquisse à deux niveaux différents qu'il est crucial de ne pas confondre :

1. L'esquisse papier préalable (variable didactique de la recherche)
 - a. Dessin de planification réalisé sur papier AVANT d'ouvrir le logiciel

- b. Outil de médiation cognitive pour structurer la décomposition mentale
 - c. Externalisation de la pensée : « Qu'est-ce que je vais faire ? »
 - d. C'est cette pratique qui sera introduite au Cycle 2
2. L'outil *Sketch* dans TinkerCAD (fonctionnalité technique)
- a. Commande du logiciel permettant de dessiner un profil 2D à l'écran
 - b. Ce profil peut ensuite être extrudé pour créer un volume 3D
 - c. Outil disponible pour tous les élèves (Groupe 1 et 2)
 - d. Fait partie de la Command Knowledge standard du logiciel

Pour éviter toute ambiguïté, j'utiliserai dans la suite le terme *esquisse* (en français, sans majuscule) pour désigner exclusivement l'esquisse papier préalable, et le terme *Sketch* (en anglais, avec majuscule) pour désigner exclusivement la commande logicielle de TinkerCAD.

3.2.2 Analyse a priori : Hypothèses par phases d'apprentissage

Je formule ici mes prédictions sur les comportements des élèves, en m'appuyant sur le cadre théorique développé au chapitre 2 (modèle van Hiele, logique CSG, savoirs tacites).

3.2.2.1 Phase A : Découverte du logiciel (Séances 1-2)

Enjeu : Appropriation des commandes de base (*Command Knowledge*): navigation, déplacement, redimensionnement.

Tâches : Suivre un tutoriel intégré au logiciel (S1), Création d'un porte-clé personnalisé en suivant des instructions pas-à-pas en direct (S2).

Prédiction : La difficulté principale sera ergonomique plutôt que géométrique. Les élèves devront d'abord apprivoiser la caméra virtuelle, et comprendre les trois axes (X / Y / Z).

Indicateur de réussite : L'élève parvient au bout du tutoriel pour la S1. Il arrive à créer son porte-clé et à exporter le fichier pour impression.

3.2.2.2 Phase B : Manipulation et opérations booléennes (Séances 3-5)

Enjeu : Comprendre la logique additive (grouper des formes) et soustractive (percer, créer du vide) de la modélisation CSG.

Tâches : Modélisation d'un dé à jouer (S3) puis d'un dé truqué avec une cavité interne (S4).

Prédiction :

- Pour le dé : difficulté à aligner précisément les chiffres sur les faces. Je m'attends à ce que les élèves tentent d'abord un placement à l'œil avant de ressentir le besoin de l'outil d'alignement.
- Pour le dé truqué : le concept de « vide comme forme » est contre-intuitif. Créer une cavité demande de concevoir le vide comme un volume solide que l'on soustrait, c'est un obstacle épistémologique classique en CSG.

Comportement observable attendus :

- Rotation fréquente de la caméra pour vérifier les alignements
- Erreur de perçage (le trou n'est pas bien placé, ou dépasse du volume plein)

3.2.2.3 Phase C : Diagnostic par rétro-ingénierie (Séances 6-7)

C'est la phase critique de ma recherche. L'autonomie est maximale, et les élèves disposent d'objets physiques à reproduire.

Séance 6 : Objets géométriques simples

Dispositif : 5 objets physique imprimés en 3D sont distribués (voir détails en Annexe 2). J'ai créé ces objets pour être « CSG-compatible ». Ils sont composés de primitives géométriques évidentes (cylindre, cubes, cônes) assemblées de manière additive. Par exemple, la petite table violette est composée d'un pavé droit aplati pour le plateau, et quatre pavés droits allongé pour les pieds.

Consigne : « Reproduis ces objets le mieux possible dans TinkerCAD. »

Prédiction : Je m'attends à une réussite globale avec une stratégie additive/soustractive simple. Les élèves identifieront les parties (un cube plein + 3 cylindres « vides ») et les assembleront.

Obstacles prévus :

- Gestion des proportions relatives et approximatives (mesure uniquement avec une règle)
- Positionnement spatial précis sur l'axe Z

Séance 7 : Le point de rupture - Le Cavalier d'échecs

Dispositif : 6 pièces d'échecs physiques, imprimées en 3D, sont proposées (voir détails en Annexe 3). Les élèves choisissent librement quelle(s) pièce(s) reproduire, en fonction de leur niveau de confiance.

Classification géométrique des pièces :

- Pièces « CSG-compatibles » (Pion, Tour, Fou, Reine, Roi) :

Ce sont des solides de révolution, décomposables en empilement verticaux de cylindres, cônes et sphères. La stratégie additive/soustractive développée aux séances précédentes devrait fonctionner.

- Le Cavalier (pièce de rupture) :

Contrairement aux autres, il présente une forme organique avec un profil de cheval qui ne correspond à aucune primitive standard de TinkerCAD. C'est un objet « résistant » à la logique CSG (voir section 2.3.2).

3.2.2.3.1 Hypothèse 1 : Blocage face à la forme organique du cavalier

Les élèves qui choisissent de modéliser le cavalier vont se heurter à un obstacle méthodologique.

Je prévois deux comportements différents :

- **Hypothèse 1a (Tentative de persistance additive) :** Certains élèves pourraient tenter de « sculpter » le cheval en empilant de multiples petites primitives (cubes, cylindres ou sphères) pour approximer la forme courbe.

Indicateurs observables :

- o Résultat « pixellisé » ou « voxelisé »
- o Grand nombre de primitives utilisées (20+)
- o Temps de réalisation long (+30min)
- o Multiples effacement et recommencements

- **Hypothèse 1b (Reconnaissance immédiate de l'impasse) :** D'autres élèves pourraient reconnaître rapidement l'impossibilité de la stratégie additive sans même l'essayer, et solliciter immédiatement de l'aide.

Indicateurs observables :

- o Demande d'aide rapide (< 5 min après le début)
- o Pas de primitives placées sur le plan de travail
- o Verbalisation du type « Je ne sais pas comment faire la forme du cheval »

Dans les deux cas, l'hypothèse centrale reste la même : l'absence d'outil de planification (esquisse papier) empêche les élèves de générer spontanément une stratégie alternative adaptée.

3.2.2.3.2 Hypothèse 2 : Absence de mobilisation spontanée des stratégies par profil

L'absence d'esquisse papier préalable devrait empêcher les élèves d'identifier qu'une approche par profil 2D (B-Rep) serait plus adaptée au cavalier. Même s'ils connaissent l'existence de l'outil *Sketch* (déjà testé et vu en démonstration), ils ne penseront pas spontanément à l'utiliser pour ce type de forme organique, car ils n'auront pas planifié leur stratégie de décomposition en amont.

En d'autres termes, ils possèdent la Command Knowledge (savoir utiliser l'outil *Sketch*), mais pas la Strategic Knowledge (savoir quand utiliser l'outil *Sketch*).

Indicateurs observables :

- Aucune utilisation spontanée de l'outil *Sketch* dans les premières minutes
- Demande d'aide à l'enseignant : « Mais Monsieur, c'est impossible de faire le cheval ! Comment on fait ? » ou « Je ne sais pas par où commencer »
- Hésitation prolongée sans passage à l'action (> 2-3 min devant l'écran sans placer de primitive)
- Nécessité d'une intervention enseignante pour suggérer l'approche par profil

3.2.3 Synthèse des hypothèses pour le Groupe 1

Pour ce premier cycle, je fais l'hypothèse que les élèves développeront spontanément des stratégies additives efficaces pour les objets simples (Séances 1 à 6), mais se heurteront à un blocage méthodologique face aux formes complexes (Séance 7).

Ce blocage devrait se manifester de deux manières :

- Soit par une tentative de persistance additive (résultat pixellisé, temps excessif)
- Soit par une reconnaissance rapide de l'impasse et une demande d'aide.

Dans les deux cas, l'absence d'esquisse papier préalable devrait empêcher les élèves de mobiliser spontanément l'approche par profil, même quand l'outil *Sketch* est disponible. Ce blocage révèle la distinction entre Command Knowledge (savoir utiliser un outil) et Strategic Knowledge (savoir quand l'utiliser).

Ces observations constitueront la base empirique pour concevoir le Cycle 2. Si mes hypothèses se vérifient, cela justifiera l'introduction de l'esquisse papier comme outil de médiation cognitive pour le Groupe 2 (section 3.3)

3.2.4 Outils de recueil des données

Pour confronter mes hypothèses a priori aux comportements réels, j'ai mis en place quatre modes d'observation complémentaires :

1. Traces numériques : Analyse des fichiers TinkerCAD (historique, nombre de primitives, types d'opérations, utilisation ou non de l'outil *Sketch*)
2. Observations directes : Notes de terrain sur les blocages, demande d'aide et verbalisation spontanées
3. Interactions enseignant-élève : Documentation des questions posées et du types d'aide apportée
4. Productions finales : Comparaison visuelle entre objet physique et objet modélisé (fidélité, proportions, stratégies utilisée)

L'utilisation de ces quatre outils permet de documenter à la fois ce qui a été fait (traces), comment cela a été fait (historique, observations) et les difficultés rencontrées (interactions). Pour la séance 7, ces données permettront de déterminer quel scénario s'est produit (Hypothèse 1a ou 1b) et si l'outil *Sketch* a été mobilisé spontanément (Hypothèse 2).

3.3 Cycle 2 : Ingénierie interventionnelle (Groupe 2)

Ce second cycle vise à répondre à la question : *Dans quelle mesure l'introduction d'une esquisse papier préalable facilite-t-elle le développement de la compétence de décomposition géométrique ?* Il s'appuie sur les trois constats de l'analyse a posteriori du Cycle 1 (section 4.1.4) et introduit une variable didactique nouvelle : l'esquisse annotée obligatoire avant chaque tâche de modélisation autonome.

3.3.1 Le dispositif didactique global

Le contexte

Le Groupe 2 présente des caractéristiques similaires au Groupe 1 : des élèves de 9ème et 10ème année, tous novices en modélisation 3D, travaillant sur les mêmes postes informatiques avec TinkerCAD, à raison d'une séance de 45 minutes par semaine.

La variable de commande : l'esquisse papier annotée

L'analyse a posteriori du Cycle 1 (section 4.1) a mis en évidence trois constats qui fondent les choix du Cycle 2. Premièrement, la décomposition additive de formes simples est accessible sans médiation (constat 1). Deuxièmement, les obstacles pour les objets simples sont techniques et non stratégiques (constat 2). Troisièmement, le changement de paradigme CSG →

B-Rep ne se produit jamais spontanément (constat 3). Ce dernier constat justifie l'introduction d'une médiation cognitive systématique : l'esquisse papier annotée, obligatoire avant chaque tâche de modélisation autonome à partir de la séance 3.

La consigne ne se limite pas à un dessin libre de l'objet. Les élèves doivent identifier et annoter les primitives géométriques qu'ils prévoient d'utiliser. Ce cadrage est un choix didactique délibéré. Lors de l'introduction de l'esquisse, j'ai explicitement distingué le schéma de planification du dessin artistique. La consigne précisait qu'il ne s'agissait pas de « bien dessiner » l'objet mais d'identifier et de positionner les primitives géométriques sur le papier. Ce recadrage visait à lever un obstacle que j'anticipais : l'aversion de nombreux élèves pour le dessin, souvent associé à une exigence esthétique (« Mais Monsieur, je suis nul en dessin ! »). En recentrant la tâche sur l'analyse structurelle plutôt que sur la représentation figurative, la consigne active spécifiquement les deux fonctions cognitives de l'esquisse identifiées dans la littérature (section 2.5.2) :

- La fonction de filtrage : en schématisant, l'élève simplifie l'objet et se concentre sur sa structure géométrique plutôt que sur son apparence globale.
- La fonction de test : en annotant les primitives, l'élève planifie sa stratégie de construction avant d'ouvrir le logiciel.

Le tout en minimisant la charge émotionnelle liée au « savoir dessiner ».

Les esquisses sont ramassées à chaque séance et conservées comme traces de recherche, permettant une analyse du processus de planification des élèves.

Précision importante : L'esquisse telle que je l'ai implémentée vise la décomposition géométrique, pas la précision des proportions. L'analyse du Cycle 1 a révélé que les proportions constituent un obstacle majeur (section 4.1.2), mais cet obstacle relève d'une compétence perceptive distincte de la décomposition en primitives. L'esquisse schématique n'est pas conçue pour y remédier. Ce point sera discuté dans les limites de la recherche (chapitre 5).

Les ajustements du programme par rapport au Cycle 1

Le programme du Cycle 2 a été ajusté sur la base de l'analyse a posteriori du Cycle 1. Le changement principal concerne la suppression des séances 3 à 5 du Groupe 1 (modélisation du dé à jouer et du dé truqué). L'analyse a posteriori a montré que les blocages observés durant les séances d'objets simples étaient quasi exclusivement d'ordre technique, Command Knowledge au sens de Chester, et non stratégiques (constat 2, section 4.1.4). Les séances du dé visaient

précisément l'apprentissage de ces compétences techniques (opérations booléennes, alignement), mais ne sollicitaient pas significativement la décomposition géométrique qui constitue l'objet de cette recherche. Ce temps libéré a été redistribué pour offrir davantage de séances sur les tâches de rétro-ingénierie, où l'esquisse préalable prend tout son sens et où la décomposition géométrique est pleinement mobilisée.

Les variables micro-didactiques

Tableau 3 - Variables micro-didactiques Cycle 2

Phase	Séances	Tâche	Degré d'autonomie	Esquisse
A. Découverte	S1-S2	Libre & Porte-Clés	Aucun (reproduction, guidée)	Non
B. Diagnostique	S3-S4	Objets simples imprimés	Total (consigne libre)	Oui
C. Rupture	S5-S6	Pièces d'échecs	Total (objets complexes)	Oui
C. Consolidation	S7	Reprise et amélioration	Total (correction)	Oui

Tableau 4 - Séances du Groupe 2

Séance	Contenu principal	Type d'activité	Compétence visée	Esquisse
S1	Premier contact TinkerCAD	Manipulation libre du logiciel	Navigation dans l'interface	Non
S2	Porte-clé personnalisé	Reproduction guidée pas-à- pas	Manipulation de primitives simples	Non
S3	Rétro-ingénierie d'objets simples	Reproduction autonome d'objets physiques	Décomposition additive avec planification	Oui
S4	Suite d'objets simples	Reproduction autonome (continuation)	Consolidation de la décomposition planifiée	Oui
S5	Pièces d'échecs (début)	Reproduction autonome d'objets complexes	Test de la planification face à la complexité	Oui
S6	Pièces d'échecs (suite)	Reproduction autonome (continuation)	Approfondissement des stratégies	Oui
S7	Reprise et amélioration	Correction des reproductions	Précision des proportions et fidélité	Oui

Le programme détaillé de chaque séance est disponible en Annexe 1.

Note méthodologique : conséquences de l'ajustement du programme

La suppression des séances consacrées au dé implique que le programme du Cycle 2 n'est pas strictement identique à celui du Cycle 1. Ce choix mérite une justification explicite dans le cadre de l'ingénierie didactique.

Il serait tentant de maintenir un programme identique pour « isoler » la variable esquisse. Cependant, cette logique relève du paradigme expérimental classique (groupe test / groupe témoin), qui n'est pas celui de l'ingénierie didactique. Comme le souligne Artigue (1988), la

validation dans cette méthodologie est essentiellement interne : elle repose sur la confrontation entre analyse a priori et analyse a posteriori, pas sur la comparaison statistique entre deux groupes. L'ajustement du dispositif entre deux cycles d'ingénierie n'est pas un biais, c'est un principe constitutif de la démarche itérative.

Cet ajustement est fondé sur l'analyse a posteriori du Cycle 1 (section 4.1.4), qui a montré que les séances du dé sollicitaient exclusivement la Command Knowledge, sans contribution significative au développement de la décomposition géométrique. Dans le format contraint du cours (7 séances de 45 minutes), maintenir ces séances aurait réduit le temps disponible pour les tâches de rétro-ingénierie, qui constituent le terrain d'observation principal de cette recherche.

Il est important de souligner que les tâches critiques restent strictement identiques entre les deux groupes : les objets simples de rétro-ingénierie (Annexe 2) et les pièces d'échecs (Annexe 3) sont les mêmes. C'est sur ces tâches que porte la comparaison, et c'est sur ces tâches que la variable « esquisse » est effectivement testée. Les élèves du Groupe 2 abordent ces tâches avec moins de pratique des opérations booléennes, mais les données du Cycle 1 montrent que ces opérations sont rapidement acquises par démonstration dès qu'un besoin se présente.

3.3.2 Analyse a priori : Hypothèse pour le groupe 2

Je formule ici mes prédictions sur les comportements attendus des élèves du Groupe 2, en m'appuyant sur le cadre théorique (chapitre 2) et sur les constats de l'analyse a posteriori du Cycle 1 (section 4.1).

Hypothèse générale : L'esquisse comme catalyseur de la transition holistique → analytique

L'esquisse annotée devrait faciliter le passage d'une perception holistique à une perception analytique des objets (section 2.2.3). En obligeant les élèves à schématiser et à nommer les primitives avant de modéliser, je fais l'hypothèse que l'esquisse force une analyse structurale de l'objet qui, sans elle, reste implicite ou ne se produit pas. C'est précisément ce que l'analyse du Cycle 1 a montré : les élèves du Groupe 1 qui restaient au niveau 1 de van Hiele pour les formes complexes (section 4.1.3) n'avaient aucun outil pour expliciter et structurer leur perception.

Phase B : Objets simples avec esquisse (Séances 3-4)

Prédiction : Pour les objets « CSG-compatibles » (les 5 objets simples identiques à la séance 6 du Groupe 1), l'esquisse devrait produire des effets observables sur les stratégies de modélisation, sans nécessairement améliorer le résultat final. En effet, le Groupe 1 avait

globalement réussi ces objets sans esquisse — l'analyse a posteriori a montré que la décomposition additive de formes simples est accessible intuitivement (constat 1, section 4.1.4). L'apport de l'esquisse devrait se manifester davantage dans le processus que dans le produit.

Indicateurs attendus :

- Temps de réflexion visible avant l'ouverture du logiciel (phase de dessin)
- Moins de tâtonnements dans TinkerCAD : les élèves savent quelles primitives poser avant de commencer
- Esquisses montrant une identification correcte des volumes constitutifs
- Possibilité d'un excès d'analyse : certains élèves pourraient passer trop de temps sur l'esquisse au détriment de la modélisation, étant donné le format court des séances (45 minutes)

Contre-hypothèse : Il est possible que l'esquisse n'apporte pas d'amélioration visible pour les objets simples, car la décomposition est suffisamment intuitive pour ne pas nécessiter d'externalisation. Dans ce cas, l'esquisse pourrait même ralentir les élèves sans bénéfice apparent.

Note sur les proportions

L'analyse du Cycle 1 a révélé que les proportions constituent l'obstacle dominant pour les objets simples (section 4.1.2), davantage que la stratégie de décomposition elle-même. L'esquisse schématique, telle qu'elle est implémentée dans ce dispositif, ne vise pas à améliorer la précision des proportions : elle cible la planification de la décomposition en primitives. Il est donc probable que les problèmes de proportions persistent chez le Groupe 2 malgré l'introduction de l'esquisse. Cette prédiction sera vérifiée dans l'analyse a posteriori.

Phase C : Pièces d'échecs avec esquisse (Séance 5-6)

C'est la phase critique de ce second cycle, directement comparable à la séance 7 du Groupe 1.

Hypothèse 1 : Meilleure planification des pièces CSG-compatibles

Pour les pièces décomposables en primitives (pion, tour, fou, reine, roi), l'esquisse annotée devrait aider les élèves à identifier la structure en empilement vertical de cylindres, cônes et sphères. L'analyse du Cycle 1 a montré que les profils intermédiaires et débutants identifiaient

les primitives de manière incomplète pour la tour (section 4.1.3). L'esquisse devrait forcer cette identification avant l'ouverture du logiciel.

Indicateurs attendus :

- Esquisses montrant un empilement de formes annotées (« cylindre », « sphère », « cône »)
- Modélisation plus structurée que le Groupe 1 pour les mêmes pièces
- Moins de primitives superflues dans les fichiers TinkerCAD
- Meilleure identification de la variété des primitives nécessaires

Hypothèse 2 : Le cavalier reste un point de rupture, mais le blocage est différent

Le cavalier présente une forme organique qui résiste à la décomposition en primitives simples (section 2.3.2). L'analyse du Cycle 1 a confirmé qu'aucun élève ne mobilise spontanément l'outil *Sketch* face à cette forme, même en connaissant son existence (constat 3, section 4.1.4). L'esquisse papier devrait modifier la nature du blocage sans nécessairement le supprimer. Deux scénarios sont envisageables :

- **Hypothèse 2a (l'esquisse révèle l'impasse) :** En schématisant le cavalier, les élèves constatent eux-mêmes qu'ils ne parviennent pas à le décomposer en primitives annotables. L'esquisse rend visible l'inadéquation entre la forme et la stratégie CSG, sans fournir de solution alternative. Le blocage est identifié plus tôt et de manière plus consciente que dans le Groupe 1.

Indicateurs attendus :

- Esquisses du cavalier montrant un dessin du profil sans annotations de primitives
- Verbalisation du type : « Je n'arrive pas à trouver les formes » ou « Monsieur, le cavalier c'est impossible !! »
- Demande d'aide plus rapide mais mieux formulée que dans le Groupe 1
- **Hypothèse 2b (l'esquisse active l'approche par profil) :** Le fait de dessiner le cavalier sur papier pourrait amener certains élèves à « voir » le profil 2D comme une solution possible. L'acte de dessiner la silhouette du cheval sur papier est structurellement proche de ce que fait l'outil *Sketch* dans TinkerCAD (tracer un profil 2D à extruder). L'esquisse pourrait ainsi créer un pont cognitif entre le dessin papier et l'outil numérique,

activant spontanément la Strategic Knowledge (section 2.4.1) que les élèves du Groupe 1 ne parvenaient pas à mobiliser.

Indicateurs attendus :

- Esquisse montrant un profil latéral du cheval plutôt qu'une tentative de décomposition
- Utilisation spontanée de l'outil *Sketch* dans TinkerCAD sans mon intervention
- Verbalisation du type : « Si je dessine la forme du cheval, je peux peut-être l'extruder »

Cette seconde hypothèse serait le résultat le plus significatif de la recherche : elle démontrerait que l'esquisse ne sert pas seulement à planifier dans le paradigme CSG, mais qu'elle peut catalyser un changement de paradigme vers le B-Rep lorsque la situation l'exige.

Phase D : Reprise et amélioration (Séance 7)

Prédiction : Cette séance de consolidation n'existait pas dans le Groupe 1. Elle vise à affiner les reproductions, en particulier les problèmes de proportions identifiés dans le Cycle 1. La référence pour cette correction est l'objet physique lui-même, pas l'esquisse puisque cette dernière est un schéma de décomposition, pas un dessin à l'échelle. L'esquisse pourrait toutefois jouer un rôle de vérification structurelle : l'élève peut confronter son modèle numérique à son esquisse pour s'assurer que toutes les primitives prévues ont bien été utilisées et que la logique d'assemblage correspond au plan initial.

Indicateurs attendus :

- Comparaison avec l'objet physique (pas l'esquisse) pour les corrections de proportions
- Consultation éventuelle de l'esquisse pour vérifier la complétude des primitives
- Amélioration de la fidélité par rapport à la première tentative

3.3.3 Synthèse des hypothèses pour le Groupe 2

Pour ce second cycle, je fais l'hypothèse que l'esquisse annotée agira comme un catalyseur de la transition holistique → analytique, avec des effets différents selon la complexité des objets :

- Pour les objets simples (CSG-compatibles), l'esquisse devrait améliorer le processus de modélisation (moins de tâtonnements, planification visible) sans nécessairement changer le résultat final. Les problèmes de proportions, identifiés comme obstacle dominant dans le Cycle 1, devraient persister car l'esquisse schématique ne les cible pas.

- Pour les pièces d'échecs décomposables, l'esquisse devrait produire des stratégies plus structurées et une meilleure identification de la variété des primitives nécessaires.
- Pour le cavalier (objet résistant au CSG), l'esquisse devrait modifier la nature du blocage : soit en rendant l'impasse plus consciente (hypothèse 2a), soit en activant spontanément l'approche par profil (hypothèse 2b).

La confrontation de ces hypothèses avec les comportements réels constituera le cœur de l'analyse a posteriori (section 4.3). Si l'hypothèse 2b se vérifie, cela fournirait un argument fort en faveur de l'esquisse non seulement comme outil de planification, mais comme levier de changement stratégique dans l'apprentissage de la modélisation 3D.

3.3.4 Outils de recueil de données

Le dispositif de recueil est identique à celui du Cycle 1 (section 3.2.4), avec un outil supplémentaire :

1. Traces numériques : fichiers TinkerCAD (identique au Cycle 1)
2. Observations directes : notes de terrain (identique au Cycle 1)
3. Interactions enseignant-élève : documentation des échanges (identique au Cycle 1)
4. Productions finales : comparaison objet physique / objet modélisé (identique au Cycle 1)
5. Esquisses papier annotées : ramassées et conservées à chaque séance. Elles documentent le processus de planification et permettent d'analyser la qualité de la décomposition géométrique avant la modélisation, le lien entre ce qui est planifié sur papier et ce qui est réalisé dans le logiciel, et l'évolution de la capacité d'analyse au fil des séances.

La comparaison entre les deux cycles s'appuiera sur la confrontation des traces TinkerCAD (stratégies de modélisation, nombre de primitives, tâtonnements) et sur l'analyse qualitative des esquisses comme révélateurs du processus de pensée des élèves.

3.4 Grilles d'analyses et critères d'observation

Pour analyser les traces des deux groupes, j'ai construit des grilles d'observation structurées en deux couches : une couche pour décrire (ce que je vois dans les fichiers TinkerCAD) et une couche pour interpréter (ce que cela signifie au regard du cadre théorique). Pour le Groupe 2, une troisième couche s'ajoute pour croiser les esquisses papier avec les modélisations. Je présente ici les critères retenus et les raisons de ces choix.

3.4.1 Décrire : faits observables dans les traces TinkerCAD

Ces critères documentent ce que l'élève fait concrètement, sans interprétation. Ils sont identiques pour les deux groupes, ce qui permet une comparaison entre les groupes.

Le type et le nombre de primitives utilisées constituent le critère central. Chaque objet de référence possède une décomposition optimale documentée en annexe. En comparant ce que l'élève utilise à cette référence, je peux identifier si sa décomposition est correcte, incomplète ou excessive. C'est l'indicateur le plus direct de la capacité de décomposition géométrique que j'étudie.

Le nombre de suppressions et recommencements est un indicateur indirect de planification. Un élève qui supprime des primitives a posé un élément puis changé d'avis. Un recommencement complet signale un abandon de stratégie. L'hypothèse est simple : un élève qui planifie avant de modéliser (mentalement ou via l'esquisse) devrait présenter moins de suppressions.

Le tâtonnement observé (peu, moyen, beaucoup) complète le critère précédent en capturant les ajustements répétés qui ne se traduisent pas par des suppressions : redimensionnements multiples, repositionnements successifs. C'est le processus de travail global que j'évalue, pas seulement les traces discrètes.

La fidélité du résultat final est évaluée sur une échelle de 1 à 4 : 1 = méconnaissable, 2 = forme globale correcte mais proportions fausses, 3 = bon avec défauts mineurs, 4 = excellent. Cette échelle permet une comparaison entre élèves et entre groupes tout en restant simple à utiliser en classe.

Deux critères pour le contexte complètent ce dispositif : **les demandes d'aide** (moment, nature) et le **temps estimé sur l'objet**.

3.4.2 Interpréter : mobiliser les outils théoriques

Les critères que j'utilise pour interpréter servent à qualifier les comportements observés en les rapportant au cadre théorique du chapitre 2. Là encore, ils sont identiques pour les deux groupes.

La stratégie de décomposition (additive, soustractive, mixte, par profil) est liée à la distinction entre approche CSG et approche B-Rep (section 2.3.2). Ce critère me permet de repérer si l'élève reste dans le paradigme additif ou s'il mobilise l'approche par profil, notamment face au cavalier.

Le niveau de van Hiele estimé (section 2.2.2) est attribué objet par objet, pas globalement à un élève. L'analyse du Cycle 1 a en effet montré qu'un même élève peut atteindre le niveau 2

(analyse des propriétés) pour un objet simple et régresser au niveau 1 (reconnaissance visuelle globale) face à un objet complexe (section 4.1.3). Concrètement, je repère le niveau 1 quand l'élève tente d'approximer la forme globale sans identifier les composants. Le niveau 2 apparaît quand l'élève identifie explicitement les primitives constitutives et les assemble de manière structurée.

Le type de blocage s'appuie sur la distinction de Chester (section 2.4.1) entre *Command Knowledge* et *Strategic Knowledge*. Un blocage *Command* se manifeste par des tentatives répétées avec les bons éléments mais une exécution incorrecte (problèmes d'alignement, de rotation, de redimensionnement). Un blocage *Strategic* se manifeste par une absence d'action, une demande d'aide portant sur « quoi faire » plutôt que « comment faire », ou une approche manifestement inadaptée à la forme de l'objet.

3.4.3 Analyser les esquisses et croiser avec les mobilisations (Groupe 2)

Ces critères sont spécifiques au Groupe 2, puisque le Groupe 1 ne réalisait pas d'esquisse.

L'analyse des esquisses papier

J'examine chaque esquisse selon quatre dimensions :

1. **La nature de la représentation** : l'élève produit-il un dessin figuratif (l'objet tel qu'il le voit) ou un schéma analytique (les primitives géométriques identifiées séparément) ? Cette distinction met en valeur directement la transition holistique → analytique de Duval (section 2.2.3). Un dessin figuratif indique que l'élève reste dans une perception globale de l'objet. Un schéma analytique montre qu'il a basculé vers une analyse de la structure interne.
2. **La qualité de décomposition sur l'esquisse** : les primitives identifiées sont-elles correctes ? Sont-elles complètes ? L'élève distingue-t-il les volumes pleins des volumes vides ? Ces questions vérifient si la fonction de filtrage de l'esquisse (section 2.5.2) est effectivement activée.
3. **Le niveau de planification** : L'esquisse contient-elle des indications sur l'ordre d'assemblage, les positions relatives des primitives, ou les proportions ? Ces éléments vérifient si la fonction de test de l'esquisse (section 2.5.2) est mobilisée, c'est-à-dire si l'élève utilise l'esquisse pour anticiper la construction, ou seulement pour lister des formes.

4. **Les indices de comportements :** le soin apporté, les ratures, et les signes éventuels d'aversion au dessin. Ces observations me permettent d'évaluer comment les élèves s'approprient (ou résistent à) l'outil qu'est l'esquisse.

Pour le cavalier, j'examine spécifiquement si l'élève a dessiné un profil latéral (silhouette 2D du cheval) ou tenté une décomposition volumique. Ce critère teste mon hypothèse 2b (section 3.3.2) : l'acte de dessiner le cavalier pourrait-il créer un pont cognitif vers l'outil *Sketch* de TinkerCAD ?

Le croisement esquisse → modèle

Trois critères permettent de mesurer si l'esquisse a effectivement guidé la modélisation :

1. **La correspondance esquisse → modèle :** le résultat final suit-il le plan établi sur papier ? Le modèle peut correspondre à l'esquisse (l'esquisse a fonctionné comme plan de construction), diverger partiellement (l'élève a ajusté en cours de route), ou diverger complètement (l'esquisse n'a pas guidé le travail).
2. **L'écart principal :** il qualifie la nature de la divergence quand elle existe : l'élève a-t-il ajouté des primitives non prévues, abandonné des primitives planifiées, ou changé de stratégie en cours de route ?
3. **Un jugement global :** il synthétise si l'esquisse a visiblement aidé l'élève pour cet objet, en tenant compte de la correspondance esquisse → modèle et de la comparaison avec les comportements du Groupe 1 sur le même objet.

3.4.4 Vue d'ensemble

Tableau 5 - Critères d'observation

Couche	Critères	Ancrage théorique	G1	G2
Descriptive	Primitives, suppressions, tâtonnement, fidélité, temps, aide	Questions de recherche (2.8)	Oui	Oui
Interprétative	Stratégie, van Hiele, blocage Command/Strategic	Van Hiele (2.2.2), Chester (2.4.1), Duval (2.2.3)	Oui	Oui
Esquisses	Nature, décomposition, planification, comportement	Fonctions de l'esquisse (2.5.2)	Non	Oui
Croisement	Correspondance, écart, aide de l'esquisse	Question de recherche 2 (2.8.2)	Non	Oui

Le tronc commun (couches descriptive et interprétative) assure la comparabilité entre les deux groupes. Les couches spécifiques au Groupe 2 permettent d'analyser l'effet propre de l'esquisse.

4 Résultats

4.1 Analyse a posteriori du Cycle 1 (Groupe 1)

Cette section confronte les hypothèses formulées dans l'analyse a priori (section 3.2.2) aux comportements réellement observés chez cinq élèves représentatifs du Groupe 1 : deux profils avancés (E01-Lucas, E02-Elena), un profil intermédiaire (E03-Xavier) et deux profils débutants (E04-Marwa, E05-Enael). L'analyse s'appuie sur les traces TinkerCAD, les observations directes et les interactions en classe, en mobilisant les outils conceptuels définis au chapitre 2.

4.1.1 Phase A-B : Découverte et opérations booléennes

Conformément aux prédictions de l'analyse a priori, les difficultés rencontrées durant les cinq premières séances étaient principalement ergonomiques. Les élèves ont dû apprivoiser la navigation dans l'espace 3D (caméra, axes X/Y/Z) et se familiariser avec les commandes de base : déplacement, redimensionnement, groupement. Ces compétences relèvent de la Command Knowledge (Chester, 2007) et ont été acquises à des rythmes variables selon les élèves, mais sans blocage majeur. La progression du guidage strict (tutoriel, reproduction pas-à-pas) vers l'autonomie partielle (dé, dé truqué) a fonctionné comme prévu.

Le concept de « vide comme forme » lors de la soustraction booléenne (séance 4, dé truqué) a effectivement posé des difficultés à plusieurs élèves, confirmant l'obstacle épistémologique anticipé. Cependant, ces difficultés ont été surmontées par démonstration directe. Une fois le principe compris, les élèves l'ont réutilisé sans difficulté lors des séances suivantes.

4.1.2 Phase C1 : Rétro-ingénierie d'objets simples (Séance 6)

Prédiction : Je m'attendais à une réussite globale avec une stratégie additive/soustractive simple, les obstacles principaux étant la gestion des proportions et le positionnement sur l'axe Z.

Résultats observés :

L'obstacle dominant n'a pas été la stratégie de décomposition mais la fidélité des proportions. Un clivage net est apparu entre les élèves avancés (E01 et E02, fidélité 3-4 sur les trois objets) et les élèves débutants (E05, fidélité 2 sur le pavé percé et la sphère percée). Les élèves identifiaient les bonnes formes mais peinaient à reproduire les dimensions relatives des pièces. Ce problème ne relève ni de la Command Knowledge ni de la Strategic Knowledge au sens de Chester : il s'agit d'une difficulté perceptive liée à l'estimation des proportions sans instrument de mesure précis.

La sphère percée : un révélateur technique

La sphère percée sur les 3 axes s'est avérée l'objet le plus révélateur. Trois élèves sur cinq ont présenté un tâtonnement élevé (E02, E03 et E05), avec jusqu'à 4 recommencements pour E05. La difficulté ne résidait pas dans l'identification des primitives (tous ont correctement posé une sphère + 3 cylindres) mais dans la rotation des cylindres vides sur les trois axes avant la soustraction ainsi que leur alignement. Contrairement au « *cube avec faces* » percées, la sphère n'a pas de faces planes, il était alors difficile pour les élèves de réussir à aligner de manière précise les cylindres pour le perçage. Il s'agit d'un blocage de Command Knowledge : les élèves savaient quoi faire mais pas comment orienter précisément les cylindres dans l'espace. Ce constat est important pour la suite : il confirme que la décomposition géométrique (Strategic Knowledge) et la manipulation technique (Command Knowledge) sont bien deux compétences distinctes, conformément au cadre de Chester.

L'alignement : une découverte progressive

Un fait non anticipé dans l'analyse a priori a émergé : la quasi-totalité des élèves alignait les primitives « à la main » (par déplacement visuel) plutôt qu'en utilisant l'outil d'alignement de TinkerCAD. Cette technique d'alignement manuel a des limites structurelles, comme le révèle la sphère percée sur les 3 axes. Deux contraintes techniques du logiciel viennent compliquer le positionnement précis.

La première est la grille d'accrochage (*snap grid*). L'espace de travail est divisé en incréments sur lesquels les objets se « magnétisent » lors du déplacement. Par défaut, cet incrément est de 1mm : un élève qui voudrait déplacer un cylindre de 0,5mm pour le centrer dans la sphère ne le peut pas. Il est possible de réduire cette grille, mais les élèves novices n'en ont pas connaissance à ce stade de l'apprentissage.

La seconde est le mode de projection visuelle. TinkerCAD affiche par défaut une vue en perspective, où les distances se déforment avec la profondeur. Pour aligner précisément un cylindre sur l'axe Z à travers une sphère, il faudrait passer en vue orthographique, une manipulation que les élèves n'ont pas encore découverte. Le résultat : l'élève « voit » un alignement correct à l'écran, mais la perspective le trompe, et le perçage n'est pas centré.

Ces deux obstacles relèvent de la Command Knowledge : ce n'est pas la stratégie de décomposition qui pose problème, mais la maîtrise fine de l'environnement logiciel.

Seuls E02 et E03 ont utilisé l'outil d'alignement, et uniquement pour la petite table. Ce comportement illustre bien la dynamique d'acquisition de la Command Knowledge : les élèves

ne cherchent un outil que lorsque le placement manuel atteint ses limites. Pour les objets simples, le placement approximatif suffit, ce qui n'incite pas à découvrir des outils plus précis.

4.1.3 Phase C2 : Les pièces d'échecs - le point de rupture (Séance 7)

Prédiction : Je m'attendais à ce que les pièces CSG-compatibles (pion, tour, fou, reine, roi) soient globalement réussies, et à ce que le cavalier provoque un blocage méthodologique se manifestant soit par une persistance additive (hypothèse 1a), soit par une reconnaissance immédiate de l'impasse (hypothèse 1b). Je prédisais également qu'aucun élève ne mobiliserait spontanément l'outil *Sketch* (hypothèse 2).

Résultats observés : les pièces CSG-compatibles

La tour a été tentée par les cinq élèves analysés. Les résultats confirment et nuancent mes prédictions. Les profils avancés (E01 et E02) ont adopté une stratégie additive efficace avec les bonnes primitives identifiées. E01 obtient une fidélité 3 avec un tâtonnement faible, ce qui témoigne d'une Strategic Knowledge en développement. Le détail le plus significatif concerne le roi : E01, le seul élève à l'avoir terminé (13 primitives, tâtonnement faible), « pose les primitives nécessaires sur le plan de travail puis les assemble ensuite ». Ce comportement révèle une forme de planification mentale, l'élève décompose d'abord, puis construit, sans avoir reçu aucune consigne de planification. C'est un indice de Strategic Knowledge émergente, développée par la seule pratique.



Figure 1 - Le roi en construction

En revanche, les profils intermédiaires et débutants (E03, E04, E05) se sont heurtés à un double obstacle sur la tour : les proportions incorrectes et une identification incomplète des primitives. E04 utilise 4 cylindres là où la décomposition optimale requiert 3 cylindres + 1 tore + 2 cônes + 2 pavés. Elle « voit » la forme globale cylindrique de la tour, mais n'analyse pas la structure fine (les moulures, le crénelage). En termes de van Hiele, elle reste au niveau 1 (reconnaissance visuelle globale) pour cet objet plus complexe, alors qu'elle avait atteint le niveau 2 pour les objets simples de la séance 6. Ce recul apparent illustre que le niveau de raisonnement géométrique n'est pas un acquis stable : il dépend de la complexité de l'objet.

Aucun des trois élèves débutants n'a pu terminer le roi, ce qui confirme que la montée en complexité (14 primitives nécessaires) dépasse les capacités de planification mentale d'élèves encore au niveau 1-2 de van Hiele sans outil de médiation externe.

Résultats observés : le cavalier - confirmation de l'hypothèse

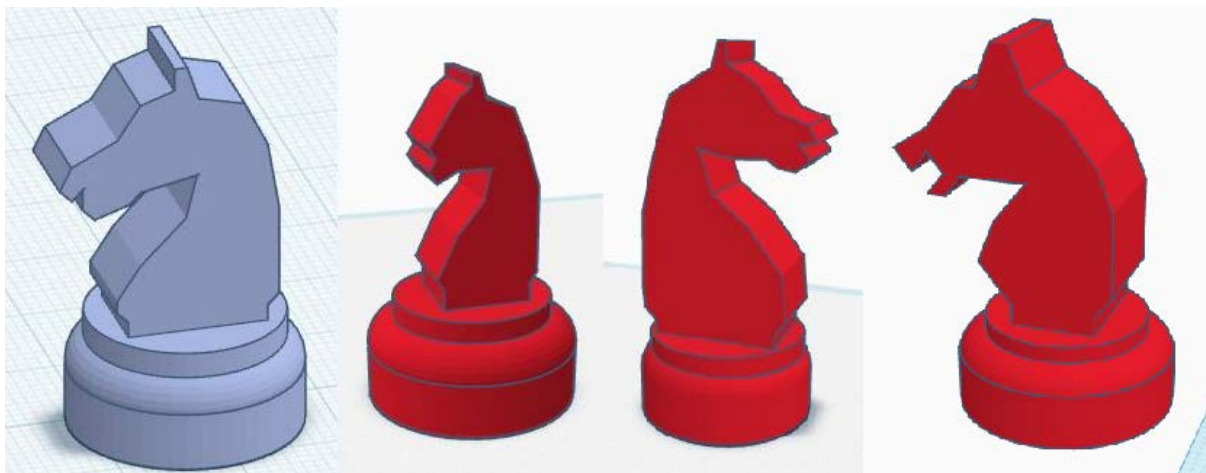


Figure 2 - Modèle / E01 / E02 / E03(de gauche à droite)

Sur les cinq élèves analysés (et la totalité des autres élèves du groupe 1), seuls trois ont tenté le cavalier. Ce faible nombre est en soi un résultat : la majorité des élèves a intuitivement évité la forme la plus complexe, ce qui suggère une capacité de détection de la difficulté même sans analyse formelle.

Le comportement des trois élèves ayant tenté le cavalier ne correspond ni exactement à l'hypothèse 1a (persistance additive produisant un résultat pixellisé) ni à l'hypothèse 1b (reconnaissance immédiate de l'impasse sans aucune tentative). Dans les deux cas, les élèves ont commencé par une approche additive pour la base du cavalier (cylindres + tore), puis se sont trouvés bloqués face à la forme organique du cheval. Ils n'ont pas persisté indéfiniment dans une stratégie inadaptée, mais n'ont pas non plus abandonné immédiatement. Le blocage se situe à un endroit intermédiaire : les élèves savaient que leur stratégie habituelle ne fonctionnerait pas, mais ne disposaient pas d'alternative.

En revanche, l'hypothèse 2 est pleinement confirmée : aucun des trois élèves n'a mobilisé spontanément l'outil *Sketch*, bien qu'ils en connaissent l'existence et l'aient déjà vu en démonstration (ou utilisé lors de la session de découverte libre). Ils possédaient la *Command Knowledge* (savoir utiliser l'outil) mais pas la *Strategic Knowledge* (savoir quand l'utiliser). Une intervention réactive de ma part a été nécessaire pour suggérer l'approche par profil 2D. Une fois

orientés, les trois élèves ont produit un cavalier. E02 et E03 avec une fidélité 3 (reproduction fidèle), E01 avec une fidélité 2 (forme libre approximative).

Ce résultat est central pour la suite de la recherche. Il démontre que le passage du paradigme CSG au paradigme B-Rep ne se produit pas spontanément, même lorsque l'outil est disponible et connu. La *Strategic Knowledge* nécessaire pour identifier quand une forme exige un changement d'approche reste tacite (Polanyi, 2012) et nécessite une médiation externe.

4.1.4 Synthèse : confrontation des hypothèses a priori avec les observations

La confrontation entre l'analyse a priori et les comportements observés fait émerger trois constats principaux.

Constat 1 : La décomposition additive de formes simples est accessible sans médiation.

Pour les objets dont la structure géométrique est évidente et explicite (pavé percé, pyramide de pavés, petite table), les élèves novices identifient spontanément les primitives constitutives. Ce résultat suggère que le niveau 2 de van Hiele (analyse des propriétés) est atteignable sans esquisse préalable lorsque l'objet est « lisible », c'est-à-dire lorsque ses composants géométriques sont visuellement évidents.

Constat 2 : L'obstacle principal pour les objets simples n'est pas stratégique mais perceptif.

Les difficultés observées relèvent massivement des proportions et de la manipulation technique (rotation, alignement), pas de la décomposition géométrique elle-même. La distinction de Chester entre *Command Knowledge* et *Strategic Knowledge* se vérifie clairement : les blocages en S6 sont presque exclusivement d'ordre technique.

Constat 3 : Le changement de paradigme (CSG → B-Rep) ne se produit pas spontanément.

C'est le résultat le plus significatif pour cette recherche. Face au cavalier, les élèves qui possédaient la *Command Knowledge* de l'outil *Sketch* n'ont pas su la mobiliser de manière autonome. L'absence d'outil de planification externe (esquisse papier) les empêche de visualiser une stratégie alternative à l'approche additive. Ce constat justifie l'introduction de l'esquisse papier préalable au Cycle 2, non seulement comme aide à la planification dans le paradigme CSG, mais comme levier potentiel pour le changement de paradigme lorsque la forme l'exige.

4.1.5 Relecture théorique

Ces trois constats prennent sens à la lumière du cadre théorique. Sur les objets simples, les élèves passent spontanément du niveau 1 au niveau 2 de van Hiele : ils dépassent la vision globale pour analyser les composants. C'est le glissement de l'holistique vers l'analytique décrit

par Duval (2005). Mais ce passage n'est pas acquis. E04 retombe au niveau 1 face à la tour, plus complexe : le niveau de raisonnement dépend de l'objet. Sur ces mêmes objets simples, le vrai frein n'est pas la décomposition, c'est la manipulation technique, la Command Knowledge de Chester (2007). Le résultat le plus parlant concerne le cavalier : aucun élève ne pense à l'outil *Sketch*, alors qu'ils l'ont déjà utilisé. C'est un savoir tacite au sens de Polanyi (2012) : ils sentent qu'ils sont bloqués, mais ne peuvent pas dire ce qui leur manque. La Strategic Knowledge qui permet de basculer du paradigme CSG vers B-Rep ne s'acquiert donc pas en pratiquant les primitives volumiques. Elle exige une médiation humaine.

4.2 Analyse a posteriori du Cycle 2 (Groupe 2)

Je confronte ici les hypothèses du Cycle 2 (section 3.3.2) aux comportements observés chez six élèves : Youssef et Oscar (profils avancés), Axel, Léandro, John-John et Elena (profils intermédiaires). L'analyse croise deux types de données : les esquisses papier et les traces TinkerCAD.

4.2.1 L'esquisse en pratique : un constat qui s'impose d'entrée

Avant de détailler les résultats par objet, un fait saute aux yeux : les élèves esquissent de moins en moins au fil du parcours. Les six élèves ont esquissé les formes simples. Pour le pion, ils ne sont plus que quatre. Pour la tour, trois. Pour le roi, un seul (John-John). Pour le cavalier, un seul (Youssef).

Autrement dit, les élèves esquissent quand c'est facile et arrêtent quand c'est difficile, exactement l'inverse de ce que mon dispositif visait.

Des esquisses figuratives, pas analytiques

Malgré ma consigne explicite de schématiser les primitives, la quasi-totalité des esquisses sont figuratives : les élèves dessinent l'objet tel qu'ils le voient, pas sa structure géométrique. Une seule exception : Oscar, qui produit dès le pion de véritables schémas analytiques : deux vues, des primitives dessinées séparément, des arêtes en traitillés pour montrer les volumes imbriqués.

Pourtant, les annotations textuelles montrent que les élèves identifient bien les primitives. Youssef écrit « il faut 1 cylindre en mode perçage et 1 rectangle ». Elena écrit « c'est composé : d'un carré et de 1 cylindre ». Mais le dessin et le texte ne s'intègrent pas : l'élève dessine l'objet d'un côté, liste les primitives de l'autre. La fonction de filtrage de l'esquisse (section 2.5.2) s'active par l'écriture, pas par le dessin.

Un vocabulaire qui trahit le registre de pensée

La plupart des élèves utilisent des termes 2D plutôt que 3D : « carré » au lieu de « pavé », « cercle » au lieu de « cylindre », « rond » au lieu de « sphère ». C'est particulièrement marqué chez John-John, qui décompose systématiquement les objets en formes planes. Pour le pavé percé, il décrit même « 4 rectangles, deux faces carrées et un trouage ». Pour le pion, il dessine le profil puis décrit des formes 2D. Ce profil d'élève qui pense en 2D dans un environnement 3D n'avait pas été anticipé dans l'analyse a priori.

4.2.2 Formes simples : confirmation des prédictions

Prédiction : L'esquisse devait améliorer le processus sans changer le résultat final. Les proportions devaient rester problématiques.

Les deux prédictions se vérifient.

Côté processus, les modélisations sont rapides (1 à 3 minutes pour le pavé percé, 1 à 5 minutes pour la table) et les suppressions quasi inexistantes. Tous les élèves identifient correctement les primitives. Comme pour le Groupe 1, la décomposition additive de formes simples est intuitivement accessible.

Côté résultat, les proportions restent l'obstacle principal. Youssef obtient une fidélité 2 sur le pavé percé, Elena également. L'esquisse schématique ne cible pas les proportions et ne les améliore pas, comme je l'avais prévu en section 3.3.2.

La sphère percée : là où l'esquisse 2D touche ses limites

C'est l'objet le plus révélateur. La correspondance esquisse → modèle est « non » pour quatre élèves sur six. La raison est simple : une vue 2D ne peut pas représenter trois cylindres traversant une sphère sur trois axes. Axel et Léandro ne dessinent que le cylindre visible de face, omettant les deux autres.

Le cas de Youssef illustre bien le problème : son esquisse était fautive (il représentait le vide central par une sphère au lieu de trois cylindres). Il a reproduit cette erreur dans TinkerCAD, puis s'est auto-corrigé très rapidement en constatant que le résultat ne correspondait pas à l'objet physique. L'esquisse n'a pas prévenu l'erreur, mais la confrontation avec le réel a permis une correction rapide.

À l'inverse, John-John obtient la meilleure performance du groupe (fidélité 4, aucun tâtonnement, 2 minutes) en posant toutes ses primitives puis en les groupant. C'est une planification mentale efficace qui ne doit rien à l'esquisse.

4.2.3 Pièces d'échecs : des résultats inattendus

Le pion : quand l'esquisse fige l'erreur

Un phénomène que je n'avais pas anticipé : Youssef, Oscar et Axel oublient tous les trois le tore dans leur esquisse ET dans leur modélisation initiale. L'esquisse et le modèle sont cohérents entre eux, mais tous deux sont incomplets. L'esquisse a bien fonctionné comme plan de construction, le problème est que le plan était défectueux.

L'esquisse ne peut pas identifier ce que l'œil ne perçoit pas. Le tore du pion est un petit arrondi sur le socle, subtil et facile à rater. Youssef a fini par se rendre compte spontanément que quelque chose clochait. Oscar a corrigé après avoir regardé chez un camarade. Axel n'a pas corrigé.

Ce résultat révèle une limite non anticipée : l'esquisse externalise la planification, mais si l'analyse perceptive de départ est incorrecte, l'esquisse fige l'erreur au lieu de la corriger.

Pour contraster, Léandro et Elena n'avaient pas esquissé le pion. Les deux identifient pourtant toutes les primitives nécessaires, y compris le tore. L'absence d'esquisse ne les a pas empêchés de réussir.

La tour : des stratégies que le Groupe 1 n'avait pas développées

La tour fait émerger trois comportements nouveaux par rapport au Groupe 1.

Le premier est l'optimisation spontanée. Youssef remplace les deux cylindres du crénelage (1 plein + 1 vide) par un seul anneau. C'est une solution plus élégante que ma décomposition de référence. C'est de la Strategic Knowledge avancée : il ne décompose pas seulement, il optimise.

Le deuxième est la diffusion entre pairs. Léandro adopte la stratégie de l'anneau après l'avoir observée chez Youssef (son voisin). Elena, une semaine plus tard et à l'opposé de la salle, redécouvre indépendamment cette même optimisation. Ce double chemin (imitation et redécouverte) suggère que la solution est suffisamment « naturelle » pour émerger chez les profils avancés.

Le troisième est la réutilisation inter-pièces. Axel identifie que plusieurs pièces partagent un socle commun et crée une base générique réutilisable. Léandro et Elena copient une partie de la

dame pour construire le roi. Ce sont des stratégies de planification à l'échelle du projet, pas seulement de l'objet. Aucun élève du Groupe 1 n'avait montré ces comportements.

Ces stratégies avancées sont-elles un effet de l'esquisse, du niveau supérieur du Groupe 2, ou de l'expérience accumulée au fil des pièces ? Les données ne permettent pas de trancher avec certitude.

Le roi : la complexité met tout le monde à l'épreuve

Le roi a été modélisé par quatre élèves mais esquissé par un seul (John-John). Son esquisse est relativement fidèle mais sa description est très incomplète : « il faut 3 cercles, des rectangles ». Il continue de décrire les primitives en formes planes. Sa modélisation obtient une fidélité 2 avec deux tores manquants. L'esquisse ne l'a pas aidé davantage que les élèves sans esquisse.

Le cas d'Elena est le contrepoint le plus intéressant : sans esquisse, elle obtient la meilleure fidélité du groupe (3) en copiant la base commune avec la dame. C'est le profil « anti-esquisse qui réussit », une élève qui modélise tout mais esquisse peu les pièces complexes, et qui s'en sort mieux que John-John qui avait esquissé.

4.2.4 Le cavalier : même blocage, diffusion différente

Prédiction : L'esquisse devait soit révéler l'impasse plus tôt (hypothèse 2a), soit activer l'approche par profil (hypothèse 2b).

Sur cinq élèves ayant modélisé le cavalier, aucun n'a utilisé l'outil *Sketch* spontanément. Tous l'ont utilisé après aide. C'est identique au Groupe 1. L'hypothèse 2b n'est pas confirmée : l'esquisse ne crée pas de pont cognitif vers l'outil *Sketch*.

L'esquisse de Youssef montre une silhouette 2D du cheval tracée en segments droits, sans annotations de primitives, avec un premier essai raturé. Il m'a dit ne pas savoir comment modéliser le cavalier « sans pouvoir expliciter ce qui lui manquait ». C'est la définition même du savoir tacite de Polanyi (2012) : il sait qu'il ne sait pas, mais il ne peut pas dire quoi. L'hypothèse 2a est partiellement confirmée, l'esquisse a rendu l'impasse consciente, mais n'a fourni aucune piste de solution.

Ce qui change par rapport au Groupe 1, c'est le mécanisme de diffusion. Dans le Groupe 1, l'intervention venait exclusivement de moi. Dans le Groupe 2, après mon explication à Youssef, Oscar écoute et reproduit la solution sans me solliciter. Puis Léandro et John-John demandent à Youssef comment faire. Seul Axel me sollicite directement, après avoir tenté de comprendre seul pendant 8 minutes.

Youssef devient un relais de *Strategic Knowledge* au sein de la classe. Ce mécanisme de diffusion entre pairs était absent du Groupe 1 et n'avait pas été anticipé dans l'analyse a priori.

4.2.5 L'abandon de l'esquisse : un résultat en soi

L'abandon progressif de l'esquisse constitue un résultat non anticipé qui interroge le dispositif lui-même.

Le gradient est brutal : 6/6 élèves esquissent les formes simples, 4/6 le pion, 3/6 la tour, 1/6 le roi, 1/6 le cavalier. Même Youssef, le plus assidu, n'esquisse pas le roi. Deux facteurs expliquent probablement cet abandon. Le temps d'abord : dans un format de 45 minutes, l'esquisse est perçue comme une contrainte qui retarde l'accès à la modélisation. La motivation ensuite : les élèves veulent modéliser, pas dessiner. Malgré mon cadrage « schéma, pas dessin artistique », plusieurs montrent des signes d'aversion dès les premières esquisses.

Ce résultat pose une question didactique que je développerai au chapitre 5 : un outil de médiation, aussi pertinent soit-il théoriquement, ne fonctionne que si les élèves se l'approprient.

4.2.6 Synthèse : cinq constats pour le Cycle 2

Constat 1 : L'esquisse active la fonction de filtrage par le texte, pas par le dessin. Les élèves identifient les primitives dans leurs annotations, mais le dessin reste figuratif. Seul Oscar produit des schémas véritablement analytiques.

Constat 2 : L'esquisse aide à la planification quand l'objet est simple. Quand l'esquisse correspond au modèle, le processus est structuré. Mais l'esquisse peut aussi figer une erreur perceptive (oubli du tore par trois élèves sur le pion).

Constat 3 : L'esquisse figurative est limitée par sa nature 2D. Pour les objets qui exigent une compréhension tridimensionnelle (sphère percée, tour), une vue unique ne capture pas la complexité. Seule une esquisse multi-vues comme celle d'Oscar exploite pleinement le potentiel de l'outil.

Constat 4 : Le changement de paradigme CSG → B-Rep ne se produit toujours pas spontanément. L'hypothèse 2b n'est pas confirmée. L'intervention humaine (enseignant ou pair) reste indispensable. En revanche, un mécanisme de diffusion entre pairs émerge dans le Groupe 2, absent du Groupe 1.

Constat 5 : Des stratégies avancées émergent dans le Groupe 2. Copier-coller, réutilisation de bases communes, optimisation de la décomposition. Ces comportements témoignent d'une

Strategic Knowledge en développement, sans qu'on puisse attribuer avec certitude leur émergence à l'esquisse plutôt qu'au niveau du groupe.

4.2.7 Relecture Théorique

Le Cycle 2 nuance la lecture du Cycle 1 sur quatre points. D'abord, l'esquisse ne remplit qu'une des deux fonctions décrites par Goldschmidt (1991) : la fonction de filtrage opère, mais par les annotations écrites, pas par le dessin. La fonction de test (essayer des assemblages sur le papier) reste absente, sauf chez Oscar dont les esquisses multi-vues coordonnent visualisation, analyse et construction comme le décrit Duval (2005). Ensuite, le cas de John-John ajoute une nuance au modèle de van Hiele : il analyse bien les objets, mais en termes 2D (« quatre rectangles, deux faces carrées »). Atteindre le niveau analytique ne suffit donc pas, il faut encore raisonner en volumes. Le savoir tacite de Polanyi (2012) se confirme face au cavalier : Youssef sait qu'il est bloqué, sans pouvoir dire pourquoi. Mais une nouveauté apparaît : la *Strategic Knowledge* se diffuse cette fois entre pairs, via Youssef comme relais, sans passer par moi. C'est cohérent avec l'idée que le savoir tacite se transmet d'abord par observation, pas par discours. Enfin, des stratégies d'optimisation émergent dans le Groupe 2 (l'anneau de Youssef, la base commune d'Axel, la copie inter-pièces d'Elena ou de Léandro) : des marqueurs d'une *Strategic Knowledge* en construction (Chester, 2007), sans qu'on puisse en attribuer la cause à l'esquisse, au niveau du groupe ou à l'expérience accumulée.

4.3 Analyse comparative Groupe 1 / Groupe 2

Cette section compare les résultats des deux cycles pour répondre à la question centrale du Cycle 2 : l'esquisse papier préalable a-t-elle facilité le développement de la compétence de décomposition géométrique ? La comparaison s'appuie sur les tâches identiques entre les deux groupes : les formes simples (pavé percé, sphère percée, petite table) et les pièces d'échecs (tour, cavalier).

Avant d'entrer dans le détail, une précaution s'impose. Les deux groupes ne sont pas strictement équivalents. Le Groupe 2 présente un niveau de modélisation globalement supérieur, avec une prise en main du logiciel plus rapide et aucun profil faible parmi les élèves analysés (contrairement au Groupe 1 qui comptait Marwa et Enael en profil débutant). Le programme a été ajusté entre les deux cycles (suppression des séances du dé). Et j'ai moi-même gagné en expérience d'enseignement entre le premier et le second semestre. Ces différences empêchent une comparaison « toutes choses égales par ailleurs » et seront discutées dans les limites au chapitre 5. Cela dit, la méthodologie d'ingénierie didactique ne repose pas sur une comparaison

statistique entre groupes mais sur la confrontation a priori / a posteriori au sein de chaque cycle (Artigue, 1988). La mise en regard des deux groupes vient enrichir l'analyse, pas la fonder.

4.3.1 Formes simples : même résultat, processus différent

Sur les formes simples, les deux groupes arrivent au même constat de base : tous les élèves identifient correctement les primitives nécessaires. La décomposition additive d'objets CSG-compatibles est accessible aux novices, avec ou sans esquisse. C'est la confirmation du constat 1 du Cycle 1.

Là où les groupes divergent, c'est dans le processus. Le Groupe 2 modélise plus vite (1 à 5 minutes pour la plupart des objets simples) et avec moins de suppressions. Mais cette différence peut s'expliquer aussi bien par l'esquisse que par le niveau supérieur du groupe. Sur la sphère percée, qui était l'objet le plus révélateur dans les deux cycles, le Groupe 1 montrait un tâtonnement élevé chez trois élèves sur cinq (E02, E03, E05 avec jusqu'à 4 recommencements). Le Groupe 2 montre un tâtonnement plus modéré, mais la fidélité reste à 2 pour quatre élèves sur six. L'obstacle technique (rotation et alignement des cylindres sur trois axes) persiste dans les deux groupes, l'esquisse ne le résout pas, car c'est un blocage de *Command Knowledge*.

Le problème des proportions, identifié comme obstacle dominant dans le Cycle 1, persiste intégralement dans le Cycle 2. Les fidélités de 2 sur le pavé percé et la sphère percée se retrouvent dans les deux groupes, chez les élèves avancés comme intermédiaires. C'est cohérent avec la position assumée en section 3.3.1 : l'esquisse schématique ne cible pas les proportions.

4.3.2 La tour : le terrain de comparaison le plus riche

La tour est la pièce que quatre élèves du Groupe 1 et cinq des six élèves du Groupe 2 ont tentée. C'est donc le meilleur terrain de comparaison directe.

Dans le Groupe 1, les profils intermédiaires et débutants (E03, E04, E05) obtenaient une fidélité 2 avec des primitives incomplètes. E04 utilisait 4 cylindres là où la décomposition requiert des primitives variées (cylindres, tore, cônes, pavés). Le Groupe 1 restait dans une décomposition grossière : les élèves voyaient la forme globale cylindrique mais n'analysaient pas les détails (moulures, crénelage).

Dans le Groupe 2, la fidélité monte à 3 pour quatre élèves sur cinq. Les primitives sont mieux identifiées, et trois comportements nouveaux apparaissent que le Groupe 1 n'avait pas développés.

Le premier est l'optimisation de la décomposition. Youssef remplace deux cylindres par un seul anneau pour le crénelage, une solution plus élégante que ma référence. Elena redécouvre cette même optimisation indépendamment. Ce type d'optimisation suppose que l'élève ne se contente pas de décomposer l'objet en reproduisant la liste de primitives, mais qu'il réfléchit à la manière la plus efficace de les assembler.

Le deuxième est la réutilisation inter-pièces. Axel crée un socle générique qu'il duplique pour plusieurs pièces. Léandro et Elena copient une partie de la dame pour construire le roi. C'est une planification qui dépasse l'objet individuel, les élèves commencent à voir les relations entre les pièces. Ce comportement n'existait pas dans le Groupe 1.

Le troisième est la diffusion de stratégies entre pairs. Léandro adopte la technique de l'anneau après avoir observé Youssef. Dans le Groupe 1, les stratégies restaient individuelles, chaque élève travaillait dans son coin sans s'inspirer des autres.

Ces trois comportements relèvent tous de la *Strategic Knowledge* au sens de Chester. Leur émergence dans le Groupe 2 est notable, même si je ne peux pas affirmer avec certitude qu'elle est due à l'esquisse plutôt qu'au niveau du groupe.

4.3.3 Le cavalier : même impasse, diffusion différente

Le cavalier est le point focal de ma recherche. La comparaison entre les deux groupes est nette.

Ce qui ne change pas : dans les deux groupes, aucun élève ne mobilise spontanément l'outil *Sketch* face au cavalier. La *Strategic Knowledge* nécessaire pour identifier quand une forme exige un changement de paradigme (CSG → B-Rep) reste hors de portée des élèves novices, avec ou sans esquisse. C'est le résultat le plus solide de cette recherche, confirmé dans les deux cycles.

Ce qui change : le mécanisme par lequel la solution arrive aux élèves. Dans le Groupe 1, mes deux élèves ayant tenté le cavalier (E01-Lucas et E02-Elena) ont chacun reçu mon aide directement. La *Strategic Knowledge* circulait exclusivement sur l'axe enseignant → élève.

Dans le Groupe 2, la diffusion suit un chemin différent. J'explique l'approche par profil à Youssef. Oscar, assis à proximité, écoute et reproduit la solution sans me solliciter. Léandro et John-John demandent ensuite à Youssef. Seul Axel me sollicite directement, après avoir cherché seul pendant 8 minutes. La *Strategic Knowledge* circule sur un double axe : enseignant → Youssef → pairs.

Cette diffusion entre pairs est un résultat non anticipé et potentiellement significatif pour la pratique enseignante. Dans un format de 45 minutes avec une classe entière, l'enseignant ne

peut pas accompagner individuellement chaque élève. Le fait qu'un élève-relais puisse transmettre une stratégie complexe (l'approche par profil) à ses camarades ouvre une piste didactique concrète.

4.3.4 Le rôle de l'esquisse : un bilan honnête

Si je reprends ma question de recherche 2, « *Dans quelle mesure l'introduction d'une esquisse papier préalable facilite-t-elle le développement de la compétence de décomposition géométrique ?* », la réponse est nuancée.

Ce que l'esquisse fait :

Elle oblige les élèves à identifier les primitives avant de modéliser, même si cette identification passe davantage par les annotations textuelles que par le dessin. Pour les objets simples et les pièces CSG décomposables, elle fournit un plan de construction que les élèves suivent. Quand le plan est correct, le processus de modélisation est plus fluide.

Ce que l'esquisse ne fait pas :

Elle ne provoque pas la transition holistique → analytique par le dessin, les esquisses restent massivement figuratives. Elle ne résout pas le problème des proportions. Elle ne déclenche pas le changement de paradigme CSG → B-Rep face au cavalier. Et surtout, elle est abandonnée par les élèves dès que les objets se complexifient, précisément quand elle serait le plus utile.

Ce phénomène entre en résonance avec ce que Brousseau (1998) appelle *le contrat didactique* : les élèves se construisent une lecture implicite de ce que l'enseignant attend vraiment, et hiérarchisent leurs efforts en fonction. Un outil dont le bénéfice cognitif n'est pas immédiatement visible, comme l'esquisse, finit par être perçu comme une contrainte plutôt que comme un appui, surtout quand la tâche se complexifie et que la pression temporelle augmente.

Ce que l'esquisse fait de manière inattendue :

Elle peut figer une erreur de perception. Quand trois élèves oublient le tore du pion dans leur esquisse, ils reproduisent fidèlement cette erreur dans TinkerCAD. L'esquisse a fonctionné comme plan, mais le plan était faux. Sans esquisse, d'autres élèves (Léandro, Elena) ont identifié le tore directement pendant la modélisation.

Un cas à part : Oscar

Oscar est le seul élève dont les esquisses sont véritablement analytiques : multi-vues, primitives séparées, arêtes en traitillés. C'est aussi l'un des deux profils avancés. Son cas montre ce que

l'esquisse pourrait apporter quand elle est appropriée comme outil de pensée et pas seulement comme consigne à respecter. Mais c'est un cas isolé : les cinq autres élèves n'ont pas atteint ce niveau d'utilisation.

4.3.5 Synthèse comparative

Dimension	Groupe 1 (sans esquisse)	Groupe 2 (avec esquisse)
Formes simples : décomposition	Correcte pour tous	Correcte pour tous
Formes simples : proportions	Obstacle dominant	Obstacle dominant (inchangé)
Tour : identification des primitives	Incomplète chez les profils faibles	Meilleure mais tore souvent oublié
Tour : stratégies avancées	Absentes	Copier-coller, réutilisation, optimisation
Cavalier : utilisation spontanée du <i>Sketch</i>	Jamais (0/2)	Jamais (0/5)
Cavalier : diffusion de la solution	Enseignant → élève uniquement	Enseignant → élève → pairs
Esquisse : type dominant	-	Figurative (sauf Oscar)
Esquisse : fonction activée	-	Filtrage par texte, pas par le dessin
Esquisse : abandon	-	Massif dès les pièces complexes
Profils en difficulté	2 profils débutants (Marwa, Enael)	Aucun profil débutant

Tableau 6 - Synthèse comparative Groupe 1 / Groupe 2

La comparaison montre que l'esquisse apporte un bénéfice réel mais limité : elle structure la planification pour les objets dont la complexité est compatible avec une représentation 2D, et elle contribue possiblement à l'émergence de stratégies avancées. Mais elle ne résout ni le problème des proportions, ni le blocage du changement de paradigme, et son abandon progressif

par les élèves en réduit considérablement la portée. Le résultat le plus significatif de la comparaison n'est pas directement lié à l'esquisse : c'est l'émergence d'un mécanisme de diffusion de Strategic Knowledge entre pairs dans le Groupe 2, absent du Groupe 1.

5 Apports et limites de la recherche

5.1 Apports

Un terrain quasiment vierge dans le contexte romand

Ce mémoire documente, à ma connaissance, l'une des premières expériences structurées d'enseignement de la modélisation 3D au secondaire I en Suisse romande. Si des enseignants utilisent ponctuellement des imprimantes 3D dans leurs établissements, rares sont ceux qui formalisent leur démarche, analysent les stratégies des élèves et produisent des connaissances didactiques transférables. Les résultats de cette recherche, même modestes, constituent une base sur laquelle d'autres enseignants peuvent s'appuyer pour structurer leur propre enseignement de la modélisation 3D.

La décomposition géométrique : rendre visible un savoir invisible

L'un des apports principaux de ce travail est d'avoir mis en lumière une compétence cognitive qui reste largement implicite dans l'enseignement de la modélisation 3D : la capacité de décomposition en primitives géométriques. En tant qu'ingénieur devenu enseignant, je « voyais » cette compétence sans pouvoir la nommer ni la formaliser. Le cadre théorique mobilisé (van Hiele, Chester, Duval, Polanyi) m'a permis de mettre des mots sur ce processus et de le rendre observable.

Chacun de ces auteurs éclaire une facette de la décomposition : le modèle van Hiele (Braconné-Michoux, 2014) y voit une progression du regard global vers l'analyse des propriétés ; Duval (2005), la coordination de trois processus mentaux (visualiser, analyser, construire) ; Chester (2007), un savoir stratégique (*Strategic Knowledge*) distinct de la maîtrise des commandes du logiciel (*Command Knowledge*) ; Polanyi (2012), un savoir tacite, qui se sait sans pouvoir se dire.

Les grilles d'analyse développées pour ce mémoire (section 3.4) constituent un outil concret et réutilisable. Un enseignant souhaitant observer les stratégies de ses élèves en modélisation 3D peut s'en servir directement, même sans formation en ingénierie didactique.

La distinction *Command Knowledge* / *Strategic Knowledge* comme grille de lecture

La distinction de Chester (2007) entre connaissance des commandes et connaissance stratégique s'est révélée particulièrement utile pour analyser les comportements des élèves. Elle permet de différencier les blocages techniques (l'élève ne sait pas comment aligner une primitive) des blocages stratégiques (l'élève ne sait pas quelle approche choisir face au cavalier).

Cette distinction a des implications directes pour la pratique enseignante : les deux types de blocage n'appellent pas le même type d'intervention. Un blocage *Command* se résout par une démonstration technique. Un blocage *Strategic* nécessite un accompagnement dans la réflexion, pas une recette.

Le cavalier comme révélateur du savoir tacite

Le dispositif de la pièce de rupture (le cavalier) s'est avéré être un outil diagnostique efficace. Dans les deux groupes, il a permis de rendre visible le moment exact où la stratégie additive atteint ses limites et où un changement de paradigme est nécessaire. Le fait qu'aucun élève, dans aucun des deux groupes, n'ait mobilisé spontanément l'outil *Sketch* face au cavalier est un résultat solide et reproductible. Il confirme empiriquement ce que Polanyi théorise : la *Strategic Knowledge* nécessaire pour identifier quand changer d'approche reste tacite et inaccessible sans médiation externe.

L'esquisse : un outil utile mais pas magique

L'évaluation honnête de l'esquisse papier comme outil de médiation est en elle-même un apport. Plutôt qu'un résultat binaire (« l'esquisse marche » ou « l'esquisse ne marche pas »), mes données montrent un tableau nuancé. L'esquisse aide à la planification pour les objets dont la complexité est compatible avec une représentation 2D. Elle active une fonction de filtrage, mais principalement par les annotations textuelles, pas par le dessin. Elle ne résout ni les proportions, ni le changement de paradigme. Et elle est abandonnée par les élèves quand la complexité augmente. Ce type de résultat nuancé est plus utile pour la communauté enseignante qu'un résultat triomphalement positif : il permet d'utiliser l'esquisse en connaissance de ses forces et de ses limites.

La diffusion de *Strategic Knowledge* entre pairs

Le mécanisme de diffusion observé dans le Groupe 2, où Youssef devient relais de la stratégie par profil auprès de ses camarades, est un résultat non anticipé mais potentiellement significatif pour la pratique enseignante. Il suggère qu'en identifiant et en formant un ou deux élèves-relais, un enseignant pourrait démultiplier la transmission de connaissances stratégiques dans un format contraint comme celui d'un cours de 45 minutes.

5.2 Limites

La taille et la composition des échantillons

L'analyse porte sur cinq élèves pour le Groupe 1 et six pour le Groupe 2. Ces effectifs ne permettent aucune généralisation statistique. De plus, les deux groupes ne sont pas comparables en termes de niveaux : le Groupe 1 comptait deux profils débutants (Marwa, Enael) tandis que le Groupe 2 n'en comptait aucun parmi les élèves analysés. Je ne peux donc pas affirmer que l'esquisse aide (ou n'aide pas) les élèves en difficulté, puisque je n'ai pas de profil faible dans mon échantillon G2.

Les variables non contrôlées

Plusieurs facteurs autres que l'esquisse diffèrent entre les deux groupes. Le programme a été ajusté (suppression des séances du dé). Le Groupe 2 bénéficiait de ma propre montée en compétence en tant qu'enseignant, je connaissais mieux les difficultés typiques, je formulais mes consignes plus clairement, j'anticipais certains blocages. La composition des groupes (niveau, motivation, dynamique de classe) n'était pas contrôlée. Et la période de l'année diffère (automne vs printemps), ce qui pourrait influencer la motivation ou la fatigue des élèves. Ces variables confondantes empêchent d'attribuer avec certitude les différences observées à la seule introduction de l'esquisse.

Le double rôle enseignant-chercheur

J'étais à la fois l'enseignant qui dispensait le cours et le chercheur qui analysait les résultats. Ce double rôle introduit un biais inévitable : mes interventions en classe (quand et comment j'aide un élève, la manière dont je formule les consignes, l'attention que je porte à certains élèves plutôt qu'à d'autres) influencent les données que je recueille ensuite. Ce biais est inhérent à l'ingénierie didactique, où le chercheur est partie prenante du dispositif, mais il mérite d'être reconnu explicitement.

Le format du cours : 45 minutes, une contrainte lourde

Le format de 45 minutes hebdomadaires s'est révélé être une contrainte plus pesante que je ne l'avais anticipé. C'est ce format qui explique en grande partie l'abandon de l'esquisse par les élèves : dans un temps aussi court, chaque minute consacrée au papier est une minute retirée à la modélisation. Un format de 90 minutes, avec une phase d'esquisse dédiée de 15-20 minutes suivie d'une phase de modélisation, aurait probablement donné des résultats différents. Cette limite est importante à relever car elle conditionne la transférabilité des résultats : mes

conclusions sur l'esquisse s'appliquent à un format de 45 minutes, pas nécessairement à d'autres configurations.

L'esquisse figurative vs analytique : une consigne insuffisante

Malgré mon cadrage explicite (« schématisez les primitives, ne dessinez pas joliment »), les élèves ont massivement produit des esquisses figuratives. Seul Oscar a produit des schémas véritablement analytiques. Cela suggère que la consigne seule ne suffit pas à déclencher une pratique analytique de l'esquisse. Un enseignement explicite de la technique du schéma de décomposition, par exemple en montrant un exemple de schéma analytique avant de demander aux élèves de produire le leur, aurait peut-être donné des résultats différents. C'est une piste d'amélioration du dispositif qui demanderait un troisième cycle d'ingénierie pour être testée.

Les proportions : un angle mort du dispositif

Le problème des proportions, identifié comme obstacle dominant dès le Cycle 1, n'a pas été traité par le dispositif du Cycle 2. L'esquisse schématique ne visait pas les proportions, et elles sont restées problématiques dans les deux groupes. Un dispositif complémentaire, par exemple des mesures au pied à coulisse des objets physiques, ou l'utilisation de la règle intégrée de TinkerCAD, pourrait cibler spécifiquement cet obstacle. Cette piste reste à explorer.

La transférabilité : un profil d'enseignant atypique

Mon double profil d'ingénieur et d'enseignant constitue à la fois une force et une limite de cette recherche. Ma maîtrise technique de la modélisation 3D me permet d'analyser finement les stratégies des élèves et de produire des références de décomposition optimale. Mais un enseignant sans cette expertise technique pourrait-il utiliser les mêmes grilles d'analyse ? Pourrait-il identifier les blocages de type *Strategic Knowledge* et proposer l'approche par profil au bon moment ? La question de la transférabilité de ce dispositif vers des enseignants « non-experts » en modélisation 3D reste ouverte.

6 Conclusion

Ce mémoire partait d'une question simple en apparence : comment des élèves novices apprennent-ils à décomposer des formes complexes en primitives géométriques lorsqu'ils découvrent la modélisation 3D ? Et est-ce qu'une esquisse papier préalable peut les aider dans cet apprentissage ?

Pour y répondre, j'ai conçu un dispositif en deux cycles d'ingénierie didactique, mené auprès de deux groupes successifs d'élèves du secondaire I au Collège Thurmann. Le premier groupe a travaillé sans esquisse, le second avec une esquisse annotée obligatoire. La confrontation des deux cycles permet de tirer plusieurs enseignements.

Ce que la recherche montre clairement

La capacité de décomposition géométrique n'est pas un bloc monolithique. Pour les objets dont la structure est visuellement explicite, une table composée de pavés, un pavé percé par un cylindre, les élèves novices identifient spontanément les primitives, avec ou sans esquisse. La modélisation CSG d'objets simples est accessible dès le secondaire I, ce qui légitime l'intégration de cette activité dans le cursus scolaire.

En revanche, dès que l'objet résiste à la décomposition volumique, les élèves se trouvent face à un mur. Le cavalier d'échecs, avec sa forme organique, a constitué un point de rupture dans les deux groupes. Aucun élève, sur les deux cycles, n'a mobilisé spontanément l'outil *Sketch* pour passer à une approche par profil 2D. Ils connaissaient l'outil, ils savaient l'utiliser, mais ils ne savaient pas quand l'utiliser. C'est le résultat le plus robuste de cette recherche : la *Strategic Knowledge* nécessaire au changement de paradigme (CSG → B-Rep) reste tacite et inaccessible sans médiation humaine.

Ce que la recherche nuance

L'esquisse papier préalable apporte un bénéfice réel mais limité. Elle aide les élèves à planifier leur modélisation pour les objets simples et les pièces d'échecs décomposables. Quand l'esquisse est correcte, le processus de modélisation est plus fluide. Mais ce bénéfice passe principalement par les annotations textuelles, les élèves listent les primitives en mots, et non par le dessin lui-même, qui reste figuratif chez cinq élèves sur six. Seul Oscar, avec ses esquisses multi-vues et ses arêtes en traitillés, a exploité l'esquisse comme véritable outil de pensée analytique.

L'esquisse ne résout pas le problème des proportions, qui persiste comme obstacle dominant dans les deux groupes. Elle ne déclenche pas le changement de paradigme face au cavalier. Et elle est abandonnée par les élèves dès que la complexité augmente, précisément quand elle serait le plus utile. Ce paradoxe révèle une tension entre la pertinence cognitive de l'outil et son acceptabilité par des adolescents dans un format de cours de 45 minutes.

Ce que la recherche révèle d'inattendu

Trois résultats non anticipés ont émergé de l'analyse. Le premier est le mécanisme de diffusion de *Strategic Knowledge* entre pairs observé dans le Groupe 2. Après mon intervention auprès d'un seul élève (Youssef), la stratégie par profil s'est transmise à quatre autres élèves par imitation et échange, sans que j'intervienne à nouveau. Ce phénomène, absent du Groupe 1, ouvre une piste didactique concrète : dans un format contraint, un élève-relais peut démultiplier la transmission de connaissances stratégiques.

Le deuxième est l'émergence de stratégies avancées dans le Groupe 2, copier-coller de primitives identiques, réutilisation de bases communes entre pièces, optimisation de la décomposition. Ces comportements témoignent d'une *Strategic Knowledge* en développement qui dépasse la simple décomposition objet par objet. Si je ne peux pas attribuer avec certitude ces progrès à l'esquisse, leur absence dans le Groupe 1 mérite d'être relevée.

Le troisième est la pensée planaire de certains élèves. John-John, en particulier, décompose systématiquement les objets 3D en formes 2D (« cercles », « rectangles ») plutôt qu'en volumes (« cylindres », « pavés »). Ce profil d'élève, qui pense en 2D dans un environnement 3D, n'avait pas été anticipé et mériterait une investigation plus approfondie.

Ce que la recherche apporte au cadre théorique

Les deux cycles entrent en dialogue avec les auteurs mobilisés au chapitre 2 sur trois registres : ce qu'ils confirment, ce qu'ils nuancent, ce qu'ils complètent.

Chester et Polanyi : confirmation, avec un prolongement. La distinction entre *Command Knowledge* et *Strategic Knowledge* de Chester (2007) trouve dans le cas du cavalier sa formulation la plus nette : tous les élèves savent utiliser l'outil *Sketch*, aucun ne pense à le mobiliser au bon moment. Cette dissociation se redouble du caractère tacite du savoir stratégique au sens de Polanyi (2012) : ils savent qu'ils sont bloqués sans pouvoir dire pourquoi. Mais les données du Groupe 2 ajoutent une dimension que ces auteurs n'avaient pas explorée dans un contexte scolaire : la *Strategic Knowledge* peut se transmettre entre pairs par

observation et imitation, sans verbalisation. Le cas de Youssef comme élève-relais illustre exactement ce que Polanyi appelle le compagnonnage, une diffusion qui passe par le geste, pas par le discours.

Van Hiele : confirmation, avec deux nuances. Le passage du niveau 1 au niveau 2 du modèle van Hiele (Braconne-Michoux, 2014) s'observe bien chez les élèves novices dès que la structure de l'objet est lisible. Deux nuances toutefois. D'abord, ce niveau n'est pas un acquis stable : E04 retombe au niveau 1 face à la tour, plus complexe que le pavé percé qu'elle avait pourtant bien analysé. Le niveau de raisonnement dépend de l'objet, pas seulement de l'élève. Ensuite, le cas de John-John montre qu'on peut atteindre un raisonnement analytique mais dans un registre 2D inadapté à la modélisation volumique. Atteindre le niveau 2 ne suffit donc pas, encore faut-il que l'analyse s'exerce sur des volumes, pas sur des plans.

Duval et Goldschmidt : un complément sur le rôle de l'esquisse. Duval (2005) décrit la modélisation comme une coordination de trois processus : visualiser, analyser, construire. Mes observations situent le goulot d'étranglement sur le troisième, décider de l'ordre des opérations et anticiper les jonctions. L'esquisse peut soutenir cette coordination, mais seulement quand elle est exploitée comme outil multi-vues (Oscar), pas comme dessin figuratif (les cinq autres). Cela nuance aussi le modèle de Goldschmidt (1991) : ses deux fonctions de l'esquisse, filtrage et test, ne s'activent pas spontanément chez des novices. Le filtrage passe par l'écriture annotée, plus que par le trait, et la fonction de test reste largement inactive. Goldschmidt avait pensé son modèle pour des designers expérimentés ; chez des élèves de 12-15 ans, ces fonctions doivent probablement faire l'objet d'un enseignement explicite.

Perspectives

Si cette recherche devait se prolonger, trois pistes me semblent prioritaires.

La première serait de tester un enseignement explicite de l'esquisse analytique. Mes données montrent que la consigne seule ne suffit pas à provoquer une esquisse de type analytique. Montrer aux élèves un exemple de schéma de décomposition, avec des primitives séparées, annotées, en multi-vues, avant de leur demander d'en produire un pourrait changer radicalement la nature des esquisses et, potentiellement, leur efficacité.

La deuxième serait d'explorer le mécanisme de diffusion entre pairs de manière plus systématique. Identifier des élèves-relais en début de parcours et les former explicitement à la stratégie par profil pourrait accélérer la transmission de *Strategic Knowledge* dans toute la

classe, particulièrement dans un format de 45 minutes où l'enseignant ne peut pas accompagner chaque élève individuellement.

La troisième serait de travailler spécifiquement sur les proportions, l'obstacle que ce mémoire identifie sans le traiter. Des outils complémentaires, mesures au pied à coulisse, utilisation de la règle intégrée de TinkerCAD, ou esquisse dimensionnée avec côtes techniques, pourraient cibler cet angle mort du dispositif actuel.

Ce mémoire ne prétend pas avoir trouvé la solution à l'enseignement de la décomposition géométrique au secondaire I. Mais il a documenté, avec la rigueur de l'ingénierie didactique, comment des élèves novices construisent cette compétence, où ils butent, et dans quelle mesure un outil de médiation simple, un crayon et une feuille de papier, peut les accompagner dans cet apprentissage. J'espère que ces résultats, avec leurs forces et leurs limites, seront utiles aux enseignants qui, comme moi, cherchent à donner du sens à l'impression 3D dans leurs établissements.

Bibliographie

Artigue, M. (1988). *Ingénierie didactique en mathématiques*.

Braconne-Michoux, A. (2014). *Les niveaux de pensée en géométrie de van Hiele : De la théorie à l'épreuve de la classe*.

Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. La Pensée Sauvage.

Bruner, J. (1997). *The Culture of Education*. Harvard University Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv136c601>

Burgermeister, P.-F., & Dorier, J.-L. (2013). *LA MODÉLISATION DANS L'ENSEIGNEMENT DES MATHÉMATIQUES EN SUISSE ROMANDE*.

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>

Clements, D., & Battista, M. (1992). Geometry and spatial reasoning. In *Handbook of research on mathematics teaching and learning* (Macmillan, p. 464).

Dreyfus, H. L., & Dreyfus, S. E. (1988). Mind over Machine : A Plea for the Intuitive Conception of Mind. *Educational Researcher*, 17(3), 50. <https://doi.org/10.2307/1174834>

Duval, R. (2005). LES CONDITIONS COGNITIVES DE L'APPRENTISSAGE DE LA GÉOMÉTRIE : DÉVELOPPEMENT DE LA VISUALISATION, DIFFÉRENCIATION DES RAISONNEMENTS ET COORDINATION DE LEURS FONCTIONNEMENTS. *ANNALES de DIDACTIQUE et SCIENCES COGNITIVES*, 10.

Fujita, T., Kondo, Y., Kumakura, H., Kunimune, S., & Jones, K. (2020). Spatial reasoning skills about 2D representations of 3D geometrical shapes in grades 4 to 9. *Mathematics Education Research Journal*, 32(2), 235-255. <https://doi.org/10.1007/s13394-020-00335-w>

Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, 4(2), 123-143. <https://doi.org/10.1080/10400419109534381>

Ng, O.-L., & Ye, H. (2022). Mathematics learning as embodied making : Primary students' investigation of 3D geometry with handheld 3D printing technology. *Asia Pacific Education Review*, 23(2), 311-323. <https://doi.org/10.1007/s12564-022-09755-8>

Polanyi, M. (2012). *Personal Knowledge* (1st ed). Taylor and Francis.

Šafhalter, A., Glodež, S., Šorgo, A., & Ploj Vrtič, M. (2022). Development of spatial thinking abilities in engineering 3D modeling course aimed at lower secondary students. *International Journal of Technology and Design Education*, 32(1), 167-184. <https://doi.org/10.1007/s10798-020-09597-8>

Tejera, M., Galiç, S., & Lavicza, Z. (2025). 3D Modelling and Printing in Teacher Education: A Systematic Literature Review. *Journal for STEM Education Research*. <https://doi.org/10.1007/s41979-025-00147-2>

Teplá, M., Teplý, P., & Šmejkal, P. (2022). Influence of 3D models and animations on students in natural subjects. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s40594-022-00382-8>

Annexe 1 - Programme détaillé des séances

Groupe 1 - Cycle 1 (Automne 2025)

Phase A : Découverte et premiers pas

Séance 1 - Premier contact avec TinkerCAD

Connexion à la classe TinkerCAD, découverte de l'interface et réalisation du tutoriel intégré proposé par le logiciel. Le tutoriel a suscité un faible engagement chez les élèves : l'approche abstraite, sans objectif concret immédiat, n'a pas fonctionné.

Séance 2 - Porte-clé personnalisé

Création guidée d'un porte-clé avec le prénom de l'élève. Démonstration en direct au beamer, les élèves reproduisent étape par étape. Introduction aux formes de base (cube, cylindre) et au texte 3D. Export en format STL pour impression. Tous les élèves ont réussi à produire leur porte-clé. Premier objet personnel créé et imprimé.

Phase B : Manipulation et opérations booléennes

Séance 3 - Le dé à jouer (assemblage guidé)

Démonstration pratique du lancement d'une impression 3D. Les élèves reçoivent un fichier TinkerCAD préparé contenant un cube (forme du dé) et les numéros 1 à 6 déjà créés mais non positionnés. Tâche : assembler les éléments en positionnant correctement les numéros sur chaque face. Travail de manipulation spatiale (déplacement, rotation) et d'alignement.

Séance 4 - Le dé truqué

Les élèves repartent de zéro et reproduisent un dé complet, puis ajoutent une cavité interne pour créer un déséquilibre. Introduction du concept de « trou » ou forme soustractive. Différenciation naturelle : les élèves les plus avancés commencent le dé truqué pendant que les autres terminent le dé normal.

Séance 5 - Finalisation et exploration

Finalisation du dé truqué pour les élèves restants. Exploration du site MakerWorld (plateforme de partage de modèles 3D imprimables). Séance d'inspiration et de découverte de la diversité des objets réalisables.

Phase C : Reproduction autonome

Séance 6 - Rétro-ingénierie d'objets simples

Cinq objets physiques imprimés en 3D, de complexité variable, sont distribués aux élèves (voir Annexe 1). Approche totalement libre et autonome, sans guidage technique. Consigne : « Reproduis cet objet le mieux possible. » Engagement maximal de tous les élèves, différenciation naturelle par la complexité des objets choisis. Chaque élève a produit quelque chose, quel que soit son niveau.

Séance 7 - Pièces d'échecs

Six pièces d'échecs imprimées en 3D sont proposées : pion, tour, fou, reine, roi et cavalier (voir Annexe 2). Même dispositif que la séance précédente. Les élèves choisissent une ou plusieurs pièces selon leur niveau de confiance. Un écart net apparaît entre les élèves avancés et les autres. Le cavalier constitue un point de rupture : sa forme organique ne se décompose pas en primitives simples et nécessite une approche par profil 2D. Les proportions des pièces modélisées ne sont pas toujours respectées, et certains détails discrets (comme le tore sur le socle) ne sont pas repérés par tous les élèves.

Groupe 2 - Cycle 2 (Printemps 2026)

Note : Le programme du Groupe 2 a été ajusté par rapport au Groupe 1 sur la base de l'analyse a posteriori du Cycle 1 (voir section 4.1.4). Les séances du dé (S3-S5 du Groupe 1) ont été supprimées car elles sollicitaient exclusivement la Command Knowledge sans contribution significative à la décomposition géométrique. Le temps libéré a été redistribué sur les tâches de rétro-ingénierie. L'esquisse papier annotée est introduite comme variable didactique à partir de la séance 3.

Phase A : Découverte et premiers pas

Séance 1 - Premier contact avec TinkerCAD

Manipulation libre du logiciel. Contrairement au Groupe 1, pas de tutoriel imposé : les élèves explorent l'interface à leur rythme. Ce choix découle du constat de la séance 1 du Groupe 1 (échec du tutoriel abstrait).

Séance 2 - Porte-clé personnalisé

Identique au Groupe 1 : création guidée d'un porte-clé avec le prénom de l'élève, démonstration en direct, reproduction étape par étape. Pas d'esquisse pour cette séance (activité guidée).

Phase B : Reproduction autonome avec esquisse (formes simples)

Séance 3 - Rétro-ingénierie d'objets simples (début)

Mêmes cinq objets physiques que la séance 6 du Groupe 1 (voir Annexe 1). Introduction de l'esquisse papier annotée obligatoire : avant de modéliser, chaque élève doit schématiser l'objet et identifier les primitives géométriques nécessaires. La consigne précise qu'il s'agit d'un schéma de planification, pas d'un dessin artistique. Les esquisses sont ramassées et conservées.

Séance 4 - Rétro-ingénierie d'objets simples (suite)

Continuation de la séance précédente. Les élèves qui n'ont pas terminé tous les objets poursuivent leur travail. Esquisse maintenue pour chaque nouvel objet.

Phase C : Reproduction autonome avec esquisse (pièces d'échecs)

Séance 5 - Pièces d'échecs (début)

Mêmes six pièces d'échecs que la séance 7 du Groupe 1 (voir Annexe 2). Esquisse annotée demandée. Les élèves les plus avancés commencent les pièces d'échecs, les autres terminent les objets simples.

Séance 6 - Pièces d'échecs (suite)

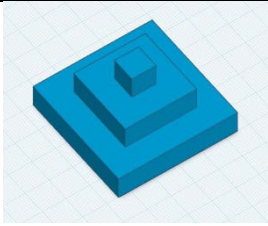
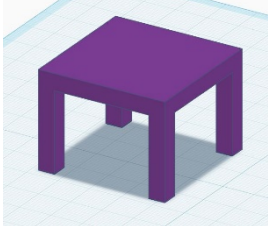
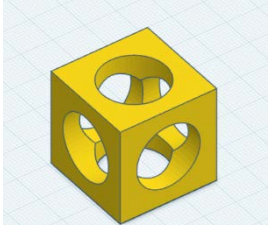
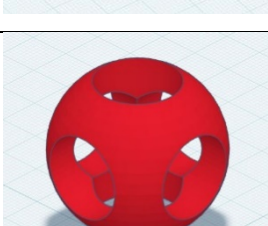
Continuation de la modélisation des pièces d'échecs. L'esquisse est de moins en moins pratiquée par les élèves pour les pièces complexes (phénomène d'abandon documenté en section 4.2.5).

Phase D : Consolidation

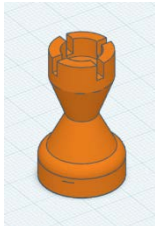
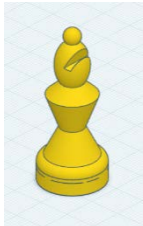
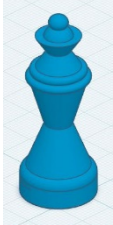
Séance 7 - Reprise et amélioration

Séance de consolidation qui n'existait pas dans le Groupe 1. Les élèves reprennent les pièces dont la reproduction est insatisfaisante, en particulier les problèmes de proportions. La référence pour la correction est l'objet physique.

Annexe 2 : Objets de rétro-ingénierie - formes simples

Nom de l'objet	Photo	Primitives nécessaires	Nb minimum de primitives	Niveau de difficulté
Pavé percé		Solide : 1 x pavé Vide : 1 x cylindre	2	Facile
Pyramide de pavés		Solide : 3 x pavés	3	Facile
Petite table		Solide : 5 x pavés	5	Intermédiaire
Cube avec faces percées		Solide : 1 x pavé Vide : 3 x cylindres	4	Intermédiaire / avancé
Sphère percée sur les 3 axes		Solide : 1 x sphère Vide : 3 x cylindres	4	Avancé

Annexe 3 : Objets de rétro-ingénierie - Pièces d'échecs

Nom de l'objet	Photo	Primitives nécessaires	Nb minimum de primitives	Niveau de difficulté
Pion		Solide : 1 x cylindre 1 x tore 3 x cônes 1 x sphère	6	Facile
Tour		Solide : 2 x cylindre 1 x tore 2 x cônes Vide : 1 x cylindre 2 x pavés	8	Facile / intermédiaire
Fou		Solide : 1 x cylindre 1 x tore 3 x cônes 2 x sphères Vide : 1 x pavé	6	Intermédiaire
Reine		Solide : 1 x cylindre 3 x tores 4 x cônes 2 x sphères	10	Intermédiaire
Roi		Solide : 2 x cylindres 5 x tores 5 x cônes 2 x pavés	14	Avancé
Cavalier		Solide : 2 x cylindres 1 x tore 1 x forme libre (esquisse)	4	Avancé

Annexe 4 - Réalisations du groupe 1

Pièces modélisées	pavé percé	pyramide de pavés	petite table	cube avec faces percées	sphère percée sur les 3 axes	pion	tour	fou	dame	roi	cavalier
David	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Elena	oui	oui	oui	oui	oui	non	partiellement	non	non	non	oui
Enael	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non
Ethan	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Faith	oui	oui	oui	oui	oui	oui	partiellement	non	non	non	non
Lorena	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Louanne	oui	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non
Lucas	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Marwa	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Nitcha	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	non
Xavier	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	partiellement	oui

Annexe 5 - Grille d'analyse des traces TinkerCAD - Groupe 1

S6 — Rétro-ingénierie d'objets simples (Groupe 1)

Élève	DESCRIPTION (faits observables)					INTERPRÉTATION			Notes libres (verbalisations, comportement)
	Objet(s) choisi(s)	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommence- ments (nb)	Tâtonnement observé	Résultat final (fidélité 1-4)	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	
E01 - Lucas	pavé percé	pavé + cylindre	0 suppression, 0 recommencement, de nombreux alignements à la main	aucun	4	mixte	2	aucun	Lucas identifie correctement toutes les primitives dès le départ, zéro suppression. Il « voit » la structure géométrique des objets, c'est du niveau 2 van Hiele (analyse des propriétés). Le léger tâtonnement sur la sphère vient de la difficulté technique de la rotation et de l'alignement des cylindres, pas d'un problème de décomposition. Profil avancé.
	sphère percée sur les 3 axes	sphères + 3 cylindres	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	peu	3	mixte	2	command (rotation, alignement)	
	petite table	5 pavés	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	peu	4	additive	2	aucun	
E02 - Elena	pavé percé	pavé + cylindre	0 suppression, 0 recommencement, de nombreux redimensionnements, alignement à la main	aucun	4	mixte	2	command (redimensionnement)	Elena identifie aussi les bonnes primitives, mais le tâtonnement « <i>beaucoup</i> » sur la sphère avec un recommencement suggère des difficultés techniques, pas stratégiques. Elle utilise l'outil d'alignement pour la table, signe qu'elle apprend et adapte. Profil avancé avec quelques hésitations techniques.
	sphère percée sur les 3 axes	sphères + 3 cylindres	0 suppression, 1 recommencement, alignement à la main	beaucoup	4	mixte	2	command (rotation, alignement)	
	petite table	5 pavés	0 suppression, 0 recommencement, alignement avec l'outil alignement	peu	4	additive	2	aucun	

E03 - Xavier	pavé percé	pavé + cylindre	0 suppression, 1 recommencement, alignement à la main	peu	4	mixte	2	aucun	Xavier a les bonnes primitives mais galère sur la sphère (2 recommencements, rotation non précise). Le fait qu'il recommence 2 fois mais finisse avec fidélité 4 montre qu'il comprend quoi faire mais pas encore comment, Command Knowledge en cours d'acquisition. La mention « rotation non précise » pointe un blocage technique, pas stratégique. Profil intermédiaire.
	sphère percée sur les 3 axes	sphères + 3 cylindres	0 suppression, 2 recommencements, alignement à la main, rotation non précise	beaucoup	4	mixte	1 -> 2	command (rotation, alignement)	
	petite table	5 pavés	0 suppression, 0 recommencement, alignement avec l'outil alignement	peu	4	additive	2	aucun	
E04 - Marwa	pavé percé	pavé + cylindre	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	moyen	3	mixte	2	aucun	Marwa identifie les bonnes primitives partout (pas de suppression), mais le tâtonnement « beaucoup » sur la table avec fidélité 4 est intéressant, elle y arrive mais le processus est laborieux. La fidélité 3 sur le pavé percé (le plus simple) est surprenante et pourrait indiquer un problème de proportions plutôt que de stratégie. Profil intermédiaire avec difficulté sur les proportions.
	sphère percée sur les 3 axes	sphères + 3 cylindres	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	moyen	4	mixte	2	command (rotation, alignement)	
	petite table	5 pavés	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	beaucoup	4	additive	1 -> 2	command (proportions)	
E05 - Enael	pavé percé	pavé + cylindre	0 suppression, 0 recommencement, alignement à la main	moyen	2	mixte	1	command (proportions)	Enael est le profil le plus fragile. Les bonnes primitives sont identifiées (pas de suppression), mais la fidélité 2 sur deux objets indique un problème persistant de proportions. Les 4 recommencements sur la sphère signalent un vrai blocage technique. Fait intéressant : fidélité 4 sur la table, qui est pourtant l'objet intermédiaire, parce que la table ne demande que de l'empilement de pavés, sans rotation ni soustraction. Profil débutant avec des compétences inégales.
	sphère percée sur les 3 axes	sphères + 3 cylindres	0 suppression, 4 recommencement, alignement à la main	beaucoup	2	mixte	1	command (rotation, alignement) + début strategic	
	petite table	5 pavés	0 suppression, 0 recommencement	moyen	4	additive	2	aucun	

S7 — Pièces d'échecs (Groupe 1)

Élève	DESCRIPTION (faits observables)					INTERPRÉTATION				
	Pièce choisie	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé	Résultat final (fidélité 1-4)	Stratégie observée (add. / profil / hybride / blocage)	Type de connaissance mobilisée (Command / Strategic)	Intervention enseignante (Aucune / Réactive / Proactive)	Verbalisations et notes libres	Remarques et commentaires
E01 - Lucas	Tour	3 x cylindres, 1 x tore, 2 x cônes, 2 x pavés	0 suppression, 0 recommencement	peu	3	mixte	strategic	aucune		Lucas est clairement le plus avancé. La note « pose les primitives nécessaires sur le plan de travail puis les assemble ensuite » pour le roi est un indice fort de Strategic Knowledge, il planifie mentalement avant d'assembler. 13 primitives pour le roi avec peu de tâtonnement, c'est remarquable. Pour le cavalier, il a eu besoin de mon intervention pour passer à l'outil Sketch, il avait la Command Knowledge des primitives CSG mais pas la Strategic Knowledge pour savoir quand changer de paradigme. Fidélité 2 sur le cavalier montre que même avec l'aide, la forme libre reste difficile.
	Roi	13 primitives	0 suppression, 0 recommencement	peu	3	additive	strategic	aucune	pose les primitives nécessaires sur le plan de travail puis les assemble ensuite.	
	Cavalier	2 x cylindres, 1 x tore, 1 x forme libre	0 suppression, 0 recommencement	moyen	2	hybride	command (pour Sketch)	réactive	la reproduction de la forme du cavalier n'est pas totalement fidèle	
E02 - Elena	Tour								non terminé	Elena n'a pas terminé la tour mais a réussi le cavalier avec fidélité 3, meilleur que Lucas. Ça suggère un profil intéressant : peut-être moins méthodique (tour non terminée) mais capable d'exécuter correctement une fois la stratégie donnée. L'intervention réactive a suffi pour débloquer la situation.
	Roi								pas observé	
	Cavalier	2 x cylindres, 1 x tore, 1 x forme libre	0 suppression, 0 recommencement	moyen	3	hybride	command (pour Sketch)	réactive	la reproduction de la forme du cavalier a pris du temps mais est fidèle au modèle original	

E03 - Xavier	Tour	3 x cylindres, 1 x tore, 2 x cônes, 2 x pavés	0 suppression, 1 recommencement	moyen	2	additive	command + strategic partiel	aucune	les proportions sont fausses	Bonnes primitives identifiées mais proportions fausses (fidélité 2). Le recommencement indique qu'il a tenté, vu que ça ne marchait pas, recommencé. Le blocage n'est ni purement technique ni purement stratégique, il sait quoi faire mais n'arrive pas à le faire avec précision. Roi non terminé confirme la difficulté croissante.
	Roi								non terminé	
	Cavalier	2 x cylindres, 1 x tore, 1 x forme libre	0 suppression, 0 recommencement	moyen	3	hybride	command (pour sketch)	réactive	forme globalement correcte	
E04 - Marwa	Tour	4 x cylindres, 2 x cônes, 2 x pavés	0 suppression, 0 recommencement	moyen	2	additive	strategic partiel	aucune	les proportions sont fausses et les primitives nécessaires n'ont pas toutes été identifiées	Le détail « primitives nécessaires n'ont pas toutes été identifiées » est clé, 4 cylindres au lieu de la décomposition attendue (3 cylindres + 1 tore + 2 cônes + 2 pavés). Elle utilise trop de cylindres, signe qu'elle ne « voit » pas encore la structure fine. C'est un indice van Hiele niveau 1→2 : elle reconnaît la forme globale mais n'analyse pas toutes les propriétés géométriques.
	Roi								non terminé	
	Cavalier								pas observé	
E05 - Enael	Tour	2 x cylindres, 2 x cônes, 2 x pavés	0 suppression, 0 recommencement	moyen	2	additive	strategic partiel	aucune	les proportions sont fausses et il manque des primitives	Même constat que Marwa mais plus prononcé, il manque des primitives et les proportions sont fausses. 2 cylindres + 2 cônes + 2 pavés : il « voit » la forme globale mais la décomposition est incomplète. Profil van Hiele niveau 1 confirmé, perception holistique sans analyse fine.
	Roi								pas observé	
	Cavalier								pas observé	

Annexe 6 - Réalisations du groupe 2

Esquisses réalisées	pavé percé	pyramide de pavés	petite table	cube avec faces percées	sphère percée sur les 3 axes	pion	tour	fou	dame	roi	cavalier
Youssef	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui
Oscar	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Axel	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non
Valentina	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	non	non	non
Elena	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non
Léandro	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	non
John-John	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non
Elvio	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non	non
Lucien	oui	oui	oui	non	oui	oui	non	non	non	non	non
Pièces modélisées	pavé percé	pyramide de pavés	petite table	cube avec faces percées	sphère percée sur les 3 axes	pion	tour	fou	dame	roi	cavalier
Youssef	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Oscar	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Axel	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	partiellement	oui
Valentina	oui	oui	oui	oui	partiellement	non	oui	non	non	non	non
Elena	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	partiellement
Léandro	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	partiellement
John-John	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	oui
Elvio	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	partiellement
Lucien	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non

Annexe 7 - Matrice de croisement esquisses ↔ modélisations - G2

Croisement Esquisses ↔ Modélisations TinkerCAD — Groupe 2

Élève	FORMES SIMPLES					PIÈCES D'ÉCHECS					
	Pavé percé	Pyramide de pavés	Petite table	Cube percé	Sphère percée	Pion	Tour	Fou	Dame	Roi	Cavalier
Youssef	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	E + M	M seul	E + M
Oscar	E + M	—	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	M seul	—	M seul
Axel	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	E + M	M seul	~M	M seul
Valentina	E + M	E + M	E + M	E + M	~M	—	E + M	E seule	—	—	—
Elena	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	M seul	M seul	E + M	M seul	~M
Léandro	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	E + M	E + M	E + M	M seul	~M
John-John	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	E + M	M seul	—	—	E + M	M seul
Elvio	M seul	M seul	M seul	M seul	M seul	E + M	M seul	E + M	—	—	~M
Lucien	E + M	E + M	E + M	M seul	E + M	E + M	—	—	—	—	—

LÉGENDE

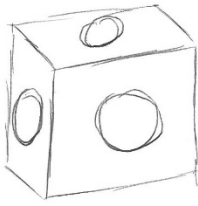
E + M	Esquisse réalisée ET modélisé dans TinkerCAD
M seul	Modélisé dans TinkerCAD SANS esquisse préalable
E seule	Esquisse réalisée mais PAS modélisé
~M / E + ~M	Modélisation partielle (avec ou sans esquisse)
—	Ni esquisse ni modélisé

Annexe 8 – Esquisses papier du groupe 2

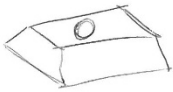
Les pages suivantes présentent les esquisses papiers que les élèves du groupe 2 ont réalisés avant de modéliser les pièces demandées dans TinkerCAD. La consigne était simple :

« Schématisez simplement, et listez les formes (primitives,) que vous voyez sur la pièce à reproduire. Le but n'est pas de faire quelque chose de « joli », le but est de pouvoir identifier les formes qui composent la pièce. »

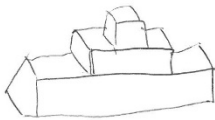
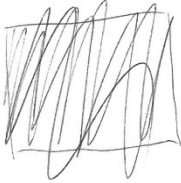
Yousset



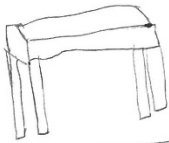
il faut 3 cylindres en mode perçage et
1 cube ~~et 1 cube~~



il faut 1 cylindres en mode perçage et
1 rectangle



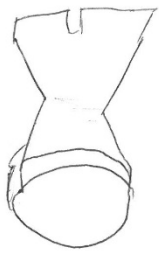
il faut 3 carrées superposés



il faut 5 carrées

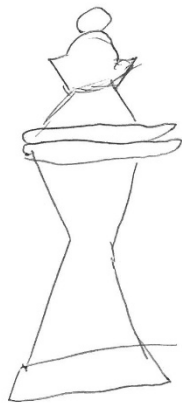


il faut 2 sphères



il faut 1 anneau 2 rectangles
2 cone 1 cercle

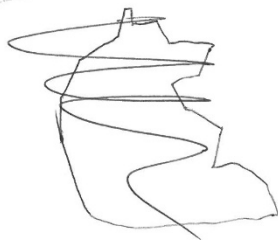
youssef.

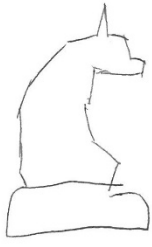


il 1 sphere 1 demi sphere
4 cone 3 anneaux

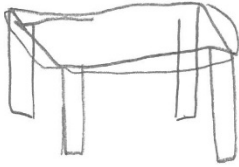


il faut 1 ~~sphere~~ sphere 1 anneau
3 cone

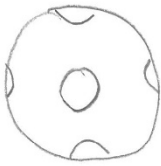




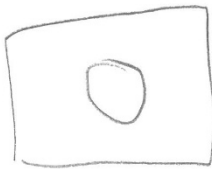
Oscar



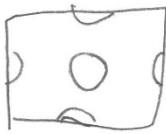
4: rectangles allongés
1: rectangle aplati



1: balle
3: cylindre en mode perçage

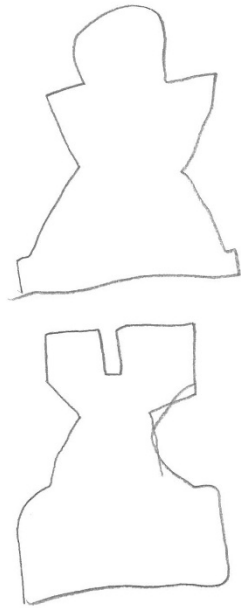


1 cylindre perçage
1 carré

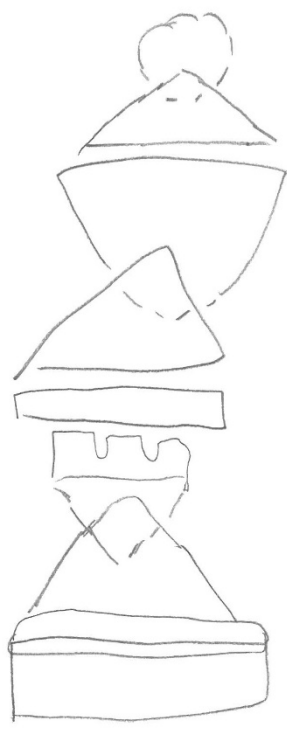


1 carré
3 cylindre

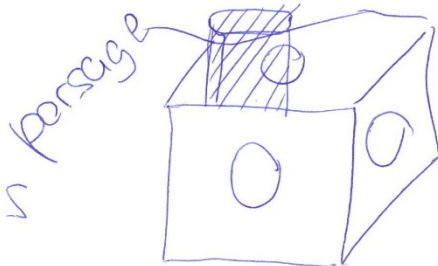
pion



Discor

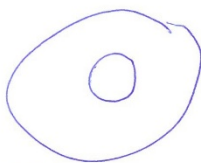


Cube
Sphere
Cylindres

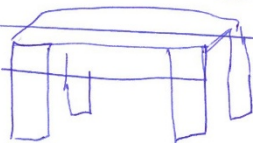


Axel

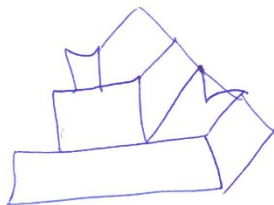
Sphère
Cylindres



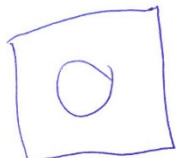
Carré



Carré



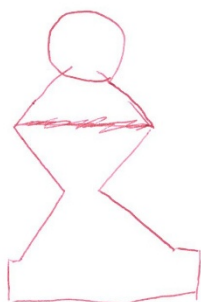
Carré
Cylindre



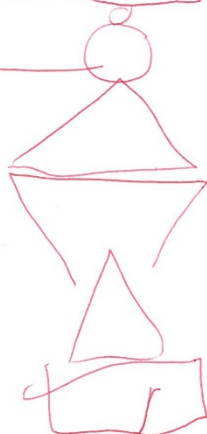
cylindre
cônes
sphere

Pion

Axel



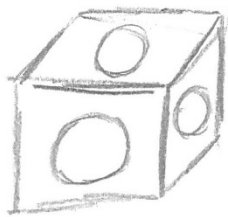
Cylindre
cônes
Sphères
carre



~~sa~~ Tour

cylindres
cônes
carrés

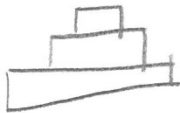
Léandro



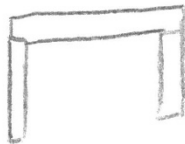
un cube
trois cylindres



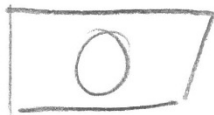
un cercle
trois cylindres



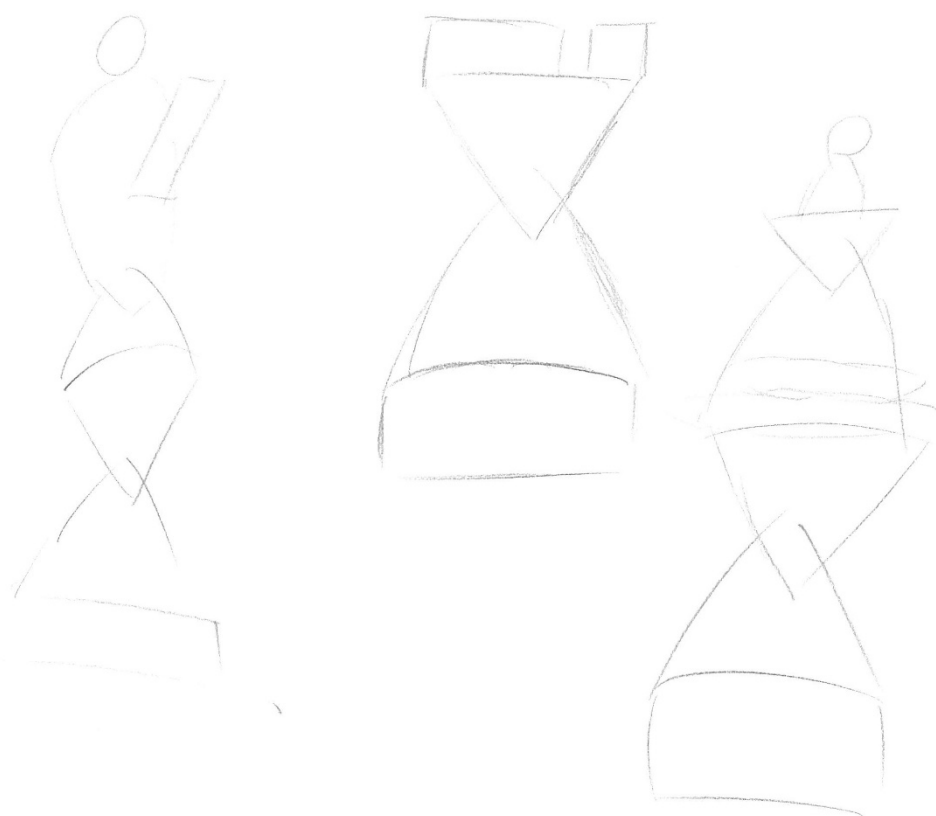
trois carré



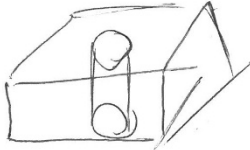
5 cubes



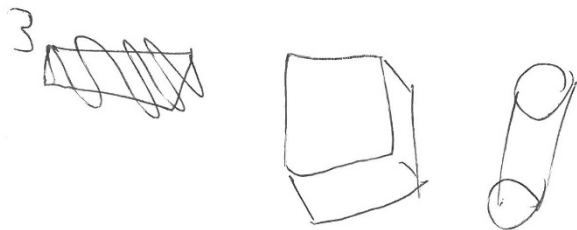
un cube
un cylindre

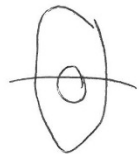


Léandro

1  il y a 4 rectangles
sur deux faces carrées et un
triangle

2 il y a carré et rectangle



 Soit a l'oc H/V

1 il faut enlever un 3 selubre

2 il faut  un carré et 3 cylindres

3 il faut 3 rectangles

1 il faut  et 4 redan

john²



il faut 3 cercles
de recouvrement

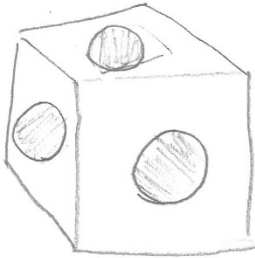


1 cercle
1 anneau
donc pour
un recouvrement

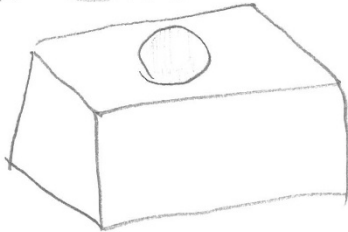


C'est composé :
d'un carré et de 3 cylindre

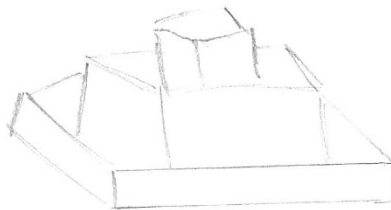
Elena



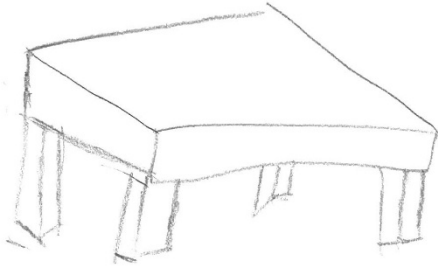
C'est composé :
d'un carré et de 1 cylindre



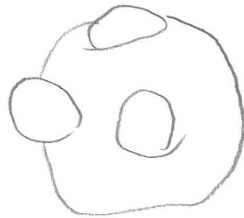
C'est composé :
de 3 carré



C'est composé:
d'un carré et de 4 rectangle



C'est composé:
d'un rond et de 3 cylindre



C'est composé :

de 2 ronds de 4 cônes, 3 cylindre

Elone



Sylindre

Pion

Elvio

cône

Sphère

Fou

Cylindre

cône

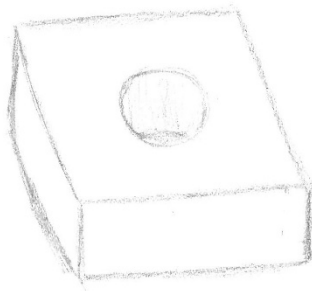
Sphère

Carré



Valentina 9'23

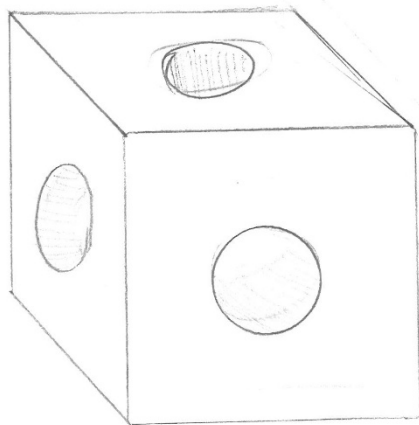
esquisse:



matériel:

1x boîte 'raplab'
1x cylindre

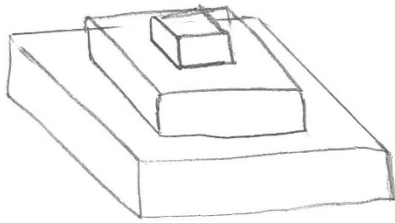
esquisse:



matériel:

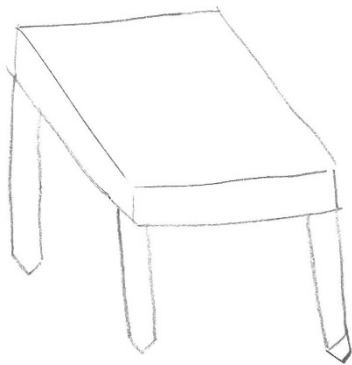
1x boîte
2x cylindres

esquisse



matériel:
3x boîtes replat

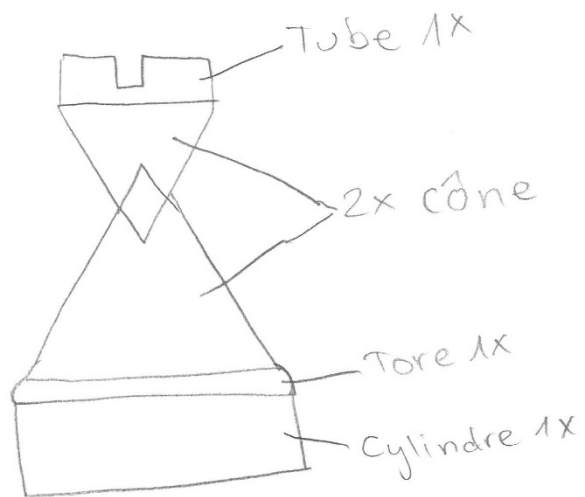
esquisse



matériel:
4x boîtes
1x boîtes replatis

Valentina

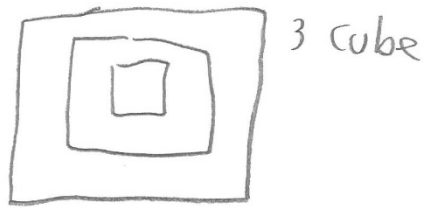
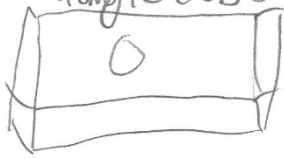
tourne d'échec



Le fou

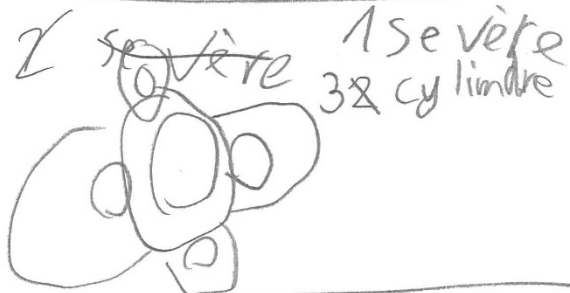


Lucien
cylindre
rectangle cube

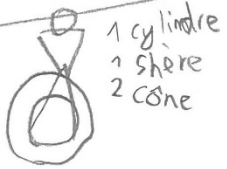


3 cube

5 cube



2 se vére 1 se vére
3x cylindre



1 cylindre
1 sphere
2 cone

Annexe 9 - Grille d'analyse des esquisses - Groupe 2

Analyse des esquisses G2 — Pavé percé

Référence : Solide: 1 pavé / Vide: 1 cylindre | Nb min : 2 | Difficulté : Facile

A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION				C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres	
	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vidé présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Flèches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)		Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)
	F	oui - "il faut 1 cylindre en mode perçage et 1 rectangle"		1 assemblées	oui	toutes	non	oui	non	implicite	non	moyen	oui - vue du dessus raturée pour recommencer en vue perspective	non	non	
	F	oui - "1 cylindre perçage + 1 carré"		1 assemblées	oui	toutes	non	oui	non	implicite	non	bas	non	non	faible	
	F	oui - "carré + cylindre"		1 assemblées	oui	toutes	non	non	non	implicite	non	bas	non	non	faible	
	F	oui - "un cube + un cylindre"		1 assemblées	oui	toutes	non	non	non	implicite	non	bas	non	non	non	
	minimaliste / mixte	oui - "il y a 4 rectangles, deux faces carrées et un trouage"		1 séparées	partiel	manque cylindre	non	oui	non	implicite	non	bâclé	oui - vue du dessus raturée pour recommencer en vue perspective	non	oui	John-John a décrit le volume comme un assemblage de formes en 2D ! Il a décomposé et aplati la forme.
	F	oui - "C'est composé : d'un carré et de 1 cylindre."		1 assemblées	oui	toutes	non	partiel	non	implicite	non	appliqué	non	non	non	L'ombre dans le cercle laisse à penser qu'Elena y représente le vde.

Analyse des esquisses G2 — Sphère percée 3 axes

Référence : Solide: 1 sphère / Vide: 3 cylindres | Nb min : 4 | Difficulté : Avancé

A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION					B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION				C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
Élève	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vidé présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Flèches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	F	oui - "il faut 2 sphères"		1 assemblées	partiel	manque trois cylindres	oui, une sphère	non	non	implicite	non	bâclé	non	non	oui	
Oscar	F	oui - "1 : balle, 3 cylindre en mode perçage"		1 assemblées	oui	oui	non	oui	non	implicite	non	moyen	non	non	faible	
Axel	F	oui - "sphere, cylindres"		1 assemblées	oui	manque de détails	non	non	non	non	non	bâclé	non	non	faible	
Léandro	F	oui - "un cercle, trois cylindres"		1 assemblées	oui	toutes	non	non	non	implicite	non	moyen	non	non	non	
John-John	F	oui - "il faut 1 sfer un 3 silindre"		1 assemblées	oui	toutes	non	non	non	non	non	bâclé	non	non	oui	
Elena	F	oui - "c'est composé : d'un rond et de 3 cylindre."		1 assemblées	oui	toutes	non	non	non	implicite	non	bâclé	non	non	faible	

Analyse des esquisses G2 — Petite table

Référence : Solide: 5 pavés | Nb min : 5 | Difficulté : Intermédiaire

A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION																
A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION					C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
Élève	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vide présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Rêches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	F	oui - "il faut 5 carrées"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	implicite	non	moyen	non	non	non	
Oscar	F	oui - "4 rectangles allongé, 1 rectangle aplati"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	implicite	non	moyen	non	non	non	
Axel	F	oui - "carré"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	implicite	non	faible	non	non	faible	
Léandro	F	oui - "5 cubes"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	partiel, manque la position de deux pavés	non	bâclé	non	non	oui	
John-John	F	oui - "il faut 1 carré et 4 rectangle"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	partiel, manque la position de deux pavés	non	bâclé	non	non	oui	
Elena	F	oui - "c'est composé : d'un carré et de 4 rectangle"	1	assemblées	oui	toutes	non	NA	non	implicite	non	appliqué	non	non	non	

Analyse des esquisses G2 — Pion

Référence : Solide: 1 cylindre, 1 tore, 3 cônes, 1 sphère | Nb min : 6 | Difficulté : Facile

A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION																
A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION					C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
Élève	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vide présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Rêches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	mixte	oui - "il faut 1 sphere, 1 anneau, 3 cone"	1	assemblées	oui	manque 1 cylindre	non	NA	non	oui	non	bâclé	non	non	oui	
Oscar	A	oui - "pion"	2	les 2	oui	manque 1 tore	non	NA	non	oui	non	moyen	non	non	non	Oscar dessine en traitillés les arêtes des profils de formes qui s'imbriquent. Ils décomposent bien en volumes distincts qu'il réassemble.
Axel	mixte	oui - "cylindre, cônes, sphere"	2	les 2	oui	manque 1 tore	non	NA	non	oui	non	faible/moyen	oui - raturer une arête	non	non	
Léandro	PAS D'ESQUISSE															
John-John	F	oui - "1 cercle, 1 anau, 2 pic, 1 ront"	1	assemblées	partiel	manque 1 cône	non	NA	non	implicite	non	bâclé	non	non	faible	John-John dessine le profil de la pièce puis décrit les formes géométriques planaires qu'il voit (et non volumiques).
Elena	PAS D'ESQUISSE															

Analyse des esquisses G2 — Tour

Référence : Solide: 2 cylindres, 1 tore, 2 cônes / Vide: 1 cylindre, 2 pavés | Nb min : 8 | Difficulté : Facile/intermédiaire

Élève	A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION				C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vide présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Rêches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	F	oui - "il faut 1 anneau, 2 rectangles, 2 cone, 1 cercle"	1	assemblées	oui	manque 2 cylindres	non	non	non	non	non	bâclé	non	non	non	il commence l'esquisse par essayer une vue en perspective, puis revient à une vue de profil en cours d'esquisse.
Oscar	A	non	2	les 2	oui	manque 1 cylindre vide	non	non	non	implicite	non	moyen	oui, une arête courbe qu'il redessine droite	non	non	Même observation que pour le pion, les arêtes imbriquées sont en traitillés.
Axel	PAS D'ESQUISSE															
Léandro	F	non	1	assemblées	oui	manque 1 tore, 1 pavé vide, 1 cylindre vide	non	non	non	non	non	bâclé	non	non	non	Comme Oscar, Léandro dessine quelques arêtes qui s'imbriquent. Mais la vue de profil ne permet pas de voir le cylindre creux au dessus de la tour.
John-John	PAS D'ESQUISSE															
Elena	PAS D'ESQUISSE															

Analyse des esquisses G2 — Roi

Référence : Solide: 2 cylindres, 5 tores, 5 cônes, 2 pavés | Nb min : 14 | Difficulté : Avancé

Référence : Solide : 2 cylindres, 5 tores, 3 cônes, 2 pavés / Nb min : 14 / Diminution : Avance																
Élève	A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION				C — PLANIFICATION			E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vide présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Rêches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	PAS D'ESQUISSE															
Oscar	PAS D'ESQUISSE															
Axel	PAS D'ESQUISSE															
Léandro	PAS D'ESQUISSE															
John-John	F	oui - "il faut 3 cercles, de rectangle"	1	assemblées	non	manque 2 cylindres, 2 tores, 5 cônes	non	NA	non	implicite	non	moyen	non	non	non	John-John continue de voir primitives sous formes de formes planaires.
Elena	PAS D'ESQUISSE															

Analyse des esquisses G2 — Cavalier (pièce de rupture)

Référence : 2 cylindres + 1 tore + 1 forme libre (esquisse) | Nb min : 4 | Difficulté : Avancé | ⚡ Seul Youssef a esquissé cette pièce

Élève	A — NATURE DE LA REPRÉSENTATION				B — QUALITÉ DE LA DÉCOMPOSITION				C — PLANIFICATION			D — CAVALIER SPÉCIFIQUE				E — INDICES COMPORTEMENTAUX				Notes libres
	Figuratif ou analytique ? (F / A / mixte)	Annotations écrites ? (Oui / Non + détail)	Nb de vues dessinées (1 / 2+)	Formes séparées ou assemblées ? (Séparées / Assemblées / Les 2)	Primitives correctes ? (Oui / Partiel / Non)	Primitives complètes ? (Toutes / Manque + lesquelles)	Primitives superflues ? (Oui + lesquelles / Non)	Distinction solide/vide présente ? (Oui / Non / NA)	Ordre d'assemblage suggéré ? (Numéros / Flèches / Disposition / Non)	Positions relatives indiquées ? (Oui / Non + détail)	Indications de proportions ? (Oui / Non + détail)	Profil latéral (silhouette 2D) ou décomposition volumique ?	Mention de Sketch ou extrusion ? (Oui / Non)	Blocage visible ? (Ratures, ?, esquisse abandonnée)	Base séparée du corps du cheval ? (Oui / Non)	Soin / investissement (Bâclé / Moyen / Appliqué)	Ratures / corrections visibles ? (Oui + quoi / Non)	Couleurs ou codes visuels ? (Oui + quoi / Non)	Signes d'aversion au dessin ? (Oui + indice / Non)	
Youssef	A	non		1 assemblées	non observable	non observable	non	NA	non	implicite	non	silhouette 2D	non	Rature d'un premier essai	non	moyen	oui, raturer une première tentative d'esquisse	non	non	Youssef est le seul à avoir fait une esquisse du cavalier. Il tente de dessiner le profil du cavalier avec des segments droits.
Oscar	PAS D'ESQUISSE — mais a modélisé le cavalier dans TinkerCAD																			
Axel	PAS D'ESQUISSE — mais a modélisé le cavalier dans TinkerCAD																			
Léandro	PAS D'ESQUISSE — mais a modélisé le cavalier dans TinkerCAD																			
John-John	PAS D'ESQUISSE — mais a modélisé le cavalier dans TinkerCAD																			
Elena	PAS D'ESQUISSE — mais a modélisé le cavalier dans TinkerCAD																			

Les fichiers Excel originaux de ces grilles d'analyses sont disponibles sur demande.

Annexe 10 - Grille d'analyse des traces TinkerCAD - Groupe 2

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Pavé percé													
Référence : Solide: 1 pavé / Vide: 1 cylindre Nb min : 2 Difficulté : Facile													
Élève	DESCRIPTION (faits observables)						INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	pavé + cylindre vide	0	aucun	2	non	1 min	mixte	2	aucun	partiel	primitive ne correspond pas	incertain	l'esquisse papier montre les arêtes verticales du pavé comme étant obliques, donnant l'impression d'un "lingot", mais la CAD est correcte.
Oscar	pavé + cylindre vide	0	aucun	3	non	1 min	mixte	2	aucun	partiel	alignement incorrect	incertain	le perçage sur l'esquisse papier est centré, ce qui n'est pas le cas dans la CAD.
Axel	pavé + cylindre vide	0	aucun	4	non	1 min	mixte	2	aucun	oui	aucun	non	
Léandro	pavé + cylindre vide	0	aucun	2	non	1 min	mixte	2	aucun	partiel	primitive ne correspond pas	non	l'esquisse papier représente un pavé rectangle, alors que l'annotation dit "cube", et c'est bien une forme carrée qui a été mise dans la CAD.
John-John	pavé + cylindre vide	0	peu	3	non	3 min	mixte	2	aucun	oui	aucun	non	
Elena	pavé + cylindre vide	1 suppression - 1 recommencement	beaucoup	4	non	11 min	mixte	2	command (dimensionnement et alignement)	partiel	primitive ne correspond pas	non	Comme pour Léandro, l'esquisse papier représente un pavé rectangle, mais la CAD montre un pavé droit carré. Passe une majorité du temps à choisir la couleur de la pièce modélisée.
Guide rapide :													
Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent													
Van Hiele : 1=reconnaît la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations													
Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul													
Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives différent, Non=stratégie complètement différente													
Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)													

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Sphère percée 3 axes

Référence : Solide: 1 sphère / Vide: 3 cylindres | Nb min : 4 | Difficulté : Avancé

DESCRIPTION (faits observables)													
DESCRIPTION (faits observables)							INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
Élève	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	2 sphères, puis 1 sphère + 3 cylindre	1 recommencement	moyen	3	oui, quand Youssef s'est rendu compte que le vide central n'était pas une sphère	3 min	autre	2+	aucun	non	remplacement des 3 cylindres vide par 1 sphère vide	incertain	l'esquisse était de base fausse, représentant le vide interne de la sphère par une sphère. Youssef a essayé de reproduire cela dans TinkerCAD mais s'est rendu compte que ça n'allait pas. Il m'a demandé de l'aide pour identifier les primitives composant le vide interne de la sphère. Le temps pour se rendre compte de son erreur est extrêmement court. Youssef est très réactif.
Oscar	1 sphère, 3 cylindres	1 recommencement	moyen	2	non	12 min	mixte	2	Command (alignement)	oui		oui	L'esquisse représente bien toutes les primitives. L'alignement d'un cylindre dans la CAD est incorrect.
Axel	1 sphère, 3 cylindres	0	peu	2	non	5 min	mixte	2	aucun	non	manque 2 cylindres	non	L'esquisse ne représente qu'une vue 2D, vue de face, de la sphère, ne représentant pas le cylindre vertical et latéral.
Léandro	1 sphère, 3 cylindres	0	peu	2	non	3 min	mixte	2	aucun	non	manque 1 cylindre	incertain	Il manque la représentation du 3ème cylindre vide dans l'esquisse. L'alignement dans la CAD est incorrect.
John-John	1 sphère, 3 cylindres	0	aucun	4	non	2 min	autre	2+	aucun	non	manque 1 cylindre	non	John-John place d'abord toutes les primitives, solide et vides, puis les groupe tout à la fin. L'esquisse ne montre qu'une vue 2D d'un cercle, avec un autre plus petit cercle au centre (représentant sûrement le trou vu de face) et un trait vertical (représentant sûrement le perçage vertical)
Elena	1 sphère, 3 cylindres	0	peu	2	non	6 min	mixte	2	Command (alignement)	non		incertain	l'écart entre l'esquisse papier et la modélisation est conséquent. L'esquisse a simplement permis de repérer où placer les cylindres.

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnait la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives différent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Petite table

Référence : Solide: 5 pavés | Nb min : 5 | Difficulté : Intermédiaire

Élève	DESCRIPTION (faits observables)						INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	5 pavés	0	aucun	4	non	2 min	add, copie-colle les pieds	2+	aucun	oui		oui	Youssef modélise la table dans "le sens normal" avec le plateau au dessus et les pieds en dessous. Il copie-colle les pieds, ce qui est une stratégie avancée de modélisation.
Oscar	5 pavés	0	aucun	3	non	3 min	add	2	command (alignement)	oui		oui	Oscar modélise la table "sur le dos" avec le plateau sur le sol, et les pieds au dessus. Cette méthode est la plus rapide car elle ne nécessite pas de placer le plateau à la "bonne hauteur".
Axel	6 pavés	0	aucun	2	non	3 min	add, copie-colle les pieds	2	aucun	non	1 pavé en trop	non	Axel a créé 5 pieds, assemblés 4 pieds avec le plateau, et a supprimé le pied en trop à la fin. Comme Youssef, il modélise la dans "le sens normal", avec le plateau au dessus.
Léandro	5 pavés	0	aucun	4	non	4 min	add	2	aucun	non	manque 2 pavés	non	Léandro crée d'abord les 4 pieds et les place aux "bons endroits", puis crée le plateau, le dimensionne pour correspondre à l'écartement des pieds, et réhausse le plateau. L'esquisse ne représente qu'une vue de côté de la table, ne permettant pas de voir les deux autres pavés.
John-John	5 pavés	0	aucun	3	non	1 min	autre, copie-colle les pieds	2+	aucun	non	manque 2 pavés	non	John-John crée 1 pied, le copie-colle, place correctement les 4 pieds, crée le plateau, le dimensionne juste, et place le plateau sur les pieds. L'esquisse n'est qu'une vue de côté, qui ne représente que 2 pieds de la table.
Elena	5 pavés	0	aucun	2	non	5 min	add	2	aucun	oui		oui	Elena crée séquentiellement chaque pièce, et la place au bon endroit.

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnait la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives diffèrent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Pion

Référence : Solide: 1 cylindre, 1 tore, 3 cônes, 1 sphère | Nb min : 6 | Difficulté : Facile

Elève	DESCRIPTION (faits observables)						INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	1 anneau, 3 cônes, 1 sphère	1 recommencement	beaucoup	3	non	v1 : 7min / v2 : 3min	add	2	Strategic (choix des primitives)	oui		oui	Youssef est le seul élève à modélisé le pion en partant du haut, et en descendant. Cela se voit aussi dans son esquisse. Il a oublié la tore dans l'esquisse ET dans la modélisation. Il s'est rendu compte spontanément que quelque chose clochait entre sa CAD et le modèle, il a tâtonné longtemps pour identifier la primitive nécessaire au petit rayon sur le socle du pion. Youssef est très autonome et ne demande jamais d'aide, malgré les difficultés.
Oscar	1 cylindre, 3 cônes, 1 sphère (rajout de la tore après-coup)		0 moyen	3	non	16 min	add	2	Command (alignement)	oui		oui	Oscar a omis la tore dans son esquisse ET dans sa CAD, mais a fini par la rajouter bien après avoir terminé le pion. Je suspecte qu'il a remarqué cet oubli en regardant chez d'autres camarades. Il a repris sa CAD une fois pour des problèmes d'alignement.
Axel	1 cylindre, 3 cônes, 1 sphère		0 peu	3	non	9 min	add	2	aucun	oui	problèmes de proportions	oui	Axel a omis la tore dans son esquisse ET dans sa CAD, ce qui est cohérent entre esquisse/modélisation, mais incorrect en terme de rétro-ingénierie. L'alignement de la sphère est incorrect.
Léandro	1 cylindre, 1 tore, 3 cônes, 1 sphère		0 moyen	3	oui, pour aligner les pièces	8 min	add	2	Command (alignement)	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Les proportions ne sont pas parfaites.
John-John	1 cylindre, 1 tore, 3 cônes, 1 sphère	3 recommencements	beaucoup	3	non	v1 : 4min / v2 : 3min / v3 : 4min	add	2	aucun	oui	problèmes de proportions	incertain	John-John a recommencé spontanément 3 fois le pion car il estimait les proportions mauvaises. Il a oublié un cône dans l'esquisse mais l'a bien mis dans la CAD.
Elena	1 cylindre, 1 tore, 3 cônes, 1 sphère		0 moyen	3	oui, pour aligner les pièces	10 min	add	2	Command (alignement)	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Elena porte une attention particulière au choix des couleurs pour les pièces qu'elle modélise. Malgré l'absence d'esquisse, elle a bien identifié toutes les primitives.

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnaît la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives différent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Tour

Référence : Solide: 2 cylindres, 1 tore, 2 cônes / Vide: 1 cylindre, 2 pavés | Nb min : 8 | Difficulté : Facile/Intermédiaire

Elève	DESCRIPTION (faits observables)						INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Stratégic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	1 anneau, 2 pavés vides, 2 cônes, 1 cylindre	1 recommencement	moyen	2	non	v1 : 7 min / v2 : 3 min	mixte		2 aucun	oui	oubli de la tore, remplacement de deux cylindre par un anneau	oui	Youssef a spontanément optimisé la modélisation de la tour en utilisant 1 anneau plutôt que 2 cylindres (1 plein et 1 vide) pour le haut de la tour. Pour sa 1ère version, il modélise la tour du haut vers le bas. Il a aussi oublié la tore. Dans sa 2ème version, il modélise du bas vers le haut mais oublie toujours la tore. Il a d'ailleurs modélisé toutes les autres pièces ensuite avec cette tore pour le rayon du socle, mais n'a pas mis à jour la CAD de la tour.
Oscar	2 cylindres plein, 1 cylindre vide, 2 cônes, 2 pavés vides	0	peu	3	non	17 min	mixte		2 aucun	non	tore absente de l'esquisse mais présente dans la CAD	incertain	Oscar a oublié la tore dans son esquisse mais l'a bien mis dans sa CAD. Il reprend rapidement sa CAD par soucis de proportions.
Axel	2 cylindres plein, 1 cylindre vide, 2 cônes, 2 pavés vides	0	aucun	3	non	12 min	mixte	2+	aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Axel a remarqué que la base de plusieurs pièces était commune, il a donc créé une base commune qu'il a ensuite dupliqué pour de futures pièces. Pour modéliser les créniaux, il a posé toutes les primitives nécessaires sur le plan de travail, puis les a assemblé au fur et à mesure. Il a oublié la tore dans la CAD.
Léandro	1 cylindre plein, 1 anneau, 2 cônes,	0	aucun	3	non	6 min	mixte		2 aucun	non	Il manque la tore, 1 pavé vide et un cylindre vide, c'est une vue de côté.	non	Comme Youssef, Léandro a utilisé un anneau plutôt que 2 cylindres pour le haut de la tour, mais je suspecte que Youssef lui a montré comment faire car ils sont à côté durant le cours, et Youssef avait déjà fini la tour quand Léandro a commencé la sienne. Il manque la tore dans sa CAD.
John-John	2 cylindres plein, 1 cylindre vide, 2 pavés vides, 2 cônes, 1 tore	1 recommencement	aucun	3	non	v1 : 7 min / v2 : 4 min	mixte		2 aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Malgré l'absence d'esquisse, John-John identifie toutes les primitives nécessaires à la CAD.
Elena	1 cylindre plein, 1 tore, 2 cônes, 1 anneau, 4 cylindres vides	0	moyen	3	non	15 min	mixte		2	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Comme Youssef, Elena a utilisé un anneau plutôt que 2 cylindres pour le haut de la tour, mais contrairement à Léandro, je pense qu'elle a identifié cette optimisation seule car elle a effectué la tour 1 semaine après Youssef et Léandro, elle est à l'opposé de la salle par rapport à eux et ne les cotoie pas. Je doute donc qu'elle ai pu obtenir un indice sur cette optimisation. Par contre, elle a utilisé des cylindres vides pour faire les créniaux plutôt que pavés. Elle a d'abord mis 3 cylindres, créant 3 créniaux, puis a identifié sa faute et a rajouté un 4ème cylindre pour correspondre au modèle. L'esquisse préalable aurait pu lui permettre d'identifier cette différence immédiatement.

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnaît la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Stratégic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives diffèrent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Roi

Référence : Solide: 2 cylindres, 5 tores, 5 cônes, 2 pavés | Nb min : 14 | Difficulté : Avancé

Elève	DESCRIPTION (faits observables)						INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Stratégie (add. / soustr. / mixte / autre)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Blocage observé (Command / Strategic / Aucun)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	2 cylindres, 5 cônes, 4 tores, 2 pavés	0	peu	2	non	25 min	add	2	aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Les proportions sont incorrectes. Il manque 1 tore. L'alignement est correct.
Oscar	Pas modélisé												
Axel	incomplet	incomplet	moyen	incomplet	non	non estimé	add	2	aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Modélisation partielle
Léandro	2 cylindres, 1 anneau, 5 cônes, 4 tores, 2 pavés	Réalisé en plusieurs fois	moyen	2	non	26 min	autre (il a copié la base de la dame, et modifié le haut pour correspondre au roi)	2	aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Léandro a été le premier à identifier que le roi et la dame avait une base commune. Il a copié la base de la reine pour faire le roi. Il a rajouté un cylindre de trop sur le socle. Il a oublié 1 tore sous la croix. Les proportions sont incorrectes.
John-John	2 cylindres, 5 cônes, 3 tores, 2 pavés	0	moyen	2	non	26 min	add	2	aucun	non	l'esquisse est incomplète	non	John-John a oublié 2 tores qui sont assez difficiles à identifier sur le modèle. Les proportions ne sont pas correctes. John-John s'est surestimé et a voulu modéliser directement une pièce difficile en premier. Il s'est ensuite confronté au mur de la réalité et a revu ses ambitions à la baisse en enchaînant avec la tour.
Elena	1 cylindre, 5 cônes, 4 tores, 1 sphère, 2 pavés	0	aucun	3	non	20 min	autre (elle a copié la base de la dame, et modifié le haut pour correspondre au roi)	2+	aucun	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Elena a identifié que la reine et le roi avait une base commune jusqu'à un certain point. Elle a copié cette base commune depuis la dame, et a modifié le reste pour le roi. Elle a remplacé un cylindre + 1 tore par un e sphère aplatie. L'aspect visuel n'est pas exactement semblable au modèle.

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnait la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse→modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives différent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Analyse des traces TinkerCAD G2 — Cavalier

Référence : 2 cylindres + 1 tore + 1 forme libre (esquisse) | Nb min : 4 | Difficulté : Avancé

Elève	DESCRIPTION (faits observables)								INTERPRÉTATION			CROISEMENT ESQUISSE → MODÈLE			Notes libres
	Primitives utilisées (types + nb)	Suppressions / recommencements (nb)	Tâtonnement observé (Peu / Moyen / Beaucoup)	Résultat final (fidélité 1-4)	Outil Sketch utilisé ? (Spontané / Après aide / Non)	Demande d'aide ? (Oui / Non + moment)	Temps estimé sur l'objet	Intervention enseignante (Aucune / Réactive / Proactive)	Stratégie observée (add. / profil / hybride / blocage)	Type de connaissance mobilisée (Command / Strategic)	Niveau van Hiele (1 / 2 / 2+)	Correspondance esquisse → modèle (Oui / Partiel / Non / Pas d'esq.)	Écart principal (Primitives ajoutées / abandonnées / stratégie changée)	L'esquisse a-t-elle aidé ? (Oui / Incertain / Non / Pas d'esq.)	
Youssef	1 cylindre, 1 tore, 1 forme libre	0	moyen	3	après aide	oui, direct au début	11 min	réactive	profil	strategic	2	partiel	la forme globale de l'esquisse diffère du profil dessiné dans TinkerCAD	incertain	Youssef s'est immédiatement rendu compte qu'il lui manquait une connaissance pour modéliser le cavalier, sans pouvoir expliciter ce que c'était.
Oscar	1 forme libre	0	aucun	2	après aide	oui, direct au début	7 min	réactive	profil	strategic	2	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Oscar n'a dessiné que le profil du cavalier et n'a pas terminé la pièce en y ajoutant le socle constitué de 2 cylindres et 1 tore. Oscar a écouté l'explication que j'ai faite à Youssef et a reproduit la solution sur son PC.
Axel	2 cylindres, 1 forme libre	0	moyen	2	après aide	oui, au bout de 8 min	21 min	réactive	profil	strategic	2	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Axel est resté bloqué au début du cours et a essayé de comprendre comment faire le cavalier. Il m'a ensuite appelé pour que je lui montre l'outil sketch.
Léandro	1 forme libre	1 recommencement	beaucoup	2	après aide	oui, a demandé à son voisin Youssef	11 min	aucune	profil	strategic	2	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	Léandro n'a pas terminé la pièce et n'a réalisé que le profil du cavalier. Il a demandé à son voisin Youssef comment faire.
John-John	2 cylindres, 1 tore, 1 forme libre	1 recommencement	peu	3	après aide	oui, a demandé à son voisin Youssef	13 min	aucune	profil	strategic	2	Pas d'esquisse	—	Pas d'esquisse	John-John a recommencé une fois car il était instatisfait du premier profil.
Elena	Pas modélisé														

Guide rapide :

Fidélité : 1=méconnaissable, 2=forme globale OK mais proportions fausses, 3=bon avec défauts mineurs, 4=excellent

Van Hiele : 1=reconnaît la forme globale sans analyser, 2=identifie les propriétés/primitives, 2+=commence à raisonner sur les relations

Blocage Command = ne sait pas utiliser un outil / Blocage Strategic = ne sait pas quelle stratégie choisir / Aucun = l'élève avance seul

Correspondance esquisse → modèle : Oui=le modèle suit le plan, Partiel=certaines primitives différent, Non=stratégie complètement différente

Écart principal : qu'est-ce qui diffère entre l'esquisse et le modèle final ? (primitives ajoutées/abandonnées, stratégie changée en cours de route)

Stratégie : additive=empilement de volumes, profil=dessin 2D extrudé (Sketch), hybride=mélange, blocage=aucune stratégie trouvée

Les fichiers Excel originaux de ces grilles d'analyses sont disponibles sur demande.