

MODÉLISATION ET IMPRESSION 3D EN SOUTIEN À L'APPRENTISSAGE DE LA GÉOMÉTRIE : UNE EXPÉRIMENTATION AVEC L'IMPRESSIION 3D AU PRIMAIRE

| MAI HUY* KHOI ET OUELLETTE** JEAN-FRANÇOIS

Résumé | Cette étude explore l'intégration de la modélisation et de l'impression 3D pour soutenir l'apprentissage de la géométrie au primaire. À travers une expérimentation en classe, les élèves ont conçu et imprimé un porte-clés, mobilisant des notions de volume, de mesure et de proportionnalité, tout en développant des compétences numériques et collaboratives. Les résultats montrent que l'I3D stimule l'engagement, facilite la transition entre 2D et 3D et renforce la pensée spatiale. Toutefois, des défis subsistent, notamment en matière de formation des enseignants et d'alignement avec le curriculum. L'étude propose des recommandations pour une intégration réfléchie de l'I3D, misant sur un accompagnement pédagogique structuré et une approche progressive d'appropriation des outils de modélisation.

Mots-clés : impression 3D, modélisation, géométrie au primaire, apprentissage actif, pensée spatiale

Abstract | This study explores the integration of 3D modeling and printing to support geometry learning in elementary education. Through a classroom experiment, students designed and printed a personalized keychain, engaging with concepts of volume, measurement, and proportionality while developing digital and collaborative skills. Results show that 3D printing enhances engagement, facilitates the transition from 2D to 3D thinking, and strengthens spatial reasoning. However, challenges remain regarding teacher training and curriculum alignment. The study proposes recommendations for a thoughtful integration of 3D printing, emphasizing structured pedagogical support and a progressive approach to adopting modeling tools.

Keywords: 3D printing, modeling, geometry, active learning, spatial thinking, elementary education

I. CONTEXTUALISATION ET PROBLÉMATISATION DE LA RECHERCHE

Dans un contexte éducatif en transformation, l'essor de technologies comme l'impression 3D (I3D) ouvre de nouvelles perspectives pour l'enseignement de la géométrie au primaire. Reposant sur des concepts abstraits tels que le volume, l'aire, la capacité ou les transformations spatiales, cette discipline demeure difficile à appréhender lorsqu'elle est abordée uniquement à travers des représentations bidimensionnelles (Beauset et al., 2024). Or, de nombreuses recherches en didactique des mathématiques montrent que la manipulation concrète d'objets favorise la compréhension de ces notions complexes (Assude et al., 2022). L'I3D permet aux élèves de modéliser et de créer eux-mêmes des objets physiques, ancrant l'apprentissage dans l'expérimentation active. Cette approche s'inscrit dans une dynamique pédagogique qui valorise l'apport des outils numériques pour renforcer la visualisation et la compréhension des concepts mathématiques (Nicod & Parisod, 2018 ; Heitz Ferrand & Gillot, 2018).

* Université du Québec en Abitibi-Témiscamigue (UQAT) – Canada – khoi.maihuy@uqat.ca

** Université du Québec en Abitibi-Témiscamigue (UQAT) – Canada – jean-francois.ouellet2@uqat.ca

1. *Problématisation*

L'intérêt grandissant pour la modélisation et l'impression 3D dans l'éducation reflète la volonté d'adopter des approches plus interactives et ancrées dans l'exploration des concepts mathématiques, comme le démontrent les travaux de Cochran et al. (2016), Ndiaye et al. (2016), Ng et al. (2022) et Roy et al. (2023). De plus, des recherches francophones récentes montrent que l'I3D et la modélisation 3D favorisent le raisonnement proportionnel, la visualisation spatiale, ou encore le passage entre la géométrie 2D et la géométrie 3D (Beuset et al., 2024 ; Heitz Ferrand & Gillot, 2018 ; Nicod & Parisod, 2018).

Ces technologies permettent d'offrir une expérience d'enseignement et d'apprentissage concrète et tactile, facilitant l'accès à des notions abstraites au primaire, telles que la modélisation 3D et la mesure (Ministère de l'Éducation Nationale, France). Par ailleurs, les recherches de Ndiaye et al. (2016) et de Heitz Ferrand et Gillot (2018) montrent que l'I3D encourage la créativité et le travail collaboratif, tout en facilitant la compréhension des relations spatiales.

Cependant, l'intégration de l'I3D dans l'enseignement de la géométrie soulève plusieurs questions didactiques et méthodologiques :

- Comment l'I3D influence-t-elle la compréhension des concepts géométriques au primaire ?
- Quels sont les défis liés à l'appropriation de cette technologie par les enseignants et les élèves ?
- Comment optimiser son intégration pour assurer un apprentissage efficace et pérenne ?

Notre recherche vise à explorer ces questions en mettant en place une expérimentation centrée sur l'apprentissage du volume et des transformations spatiales au primaire.

2. *Repères culturels et interdisciplinarité*

Notre étude s'inscrit dans le cadre théorique de l'approche STIM (science, technologie, ingénierie et mathématiques), reconnue comme un levier pour une éducation intégrative répondant aux défis du 21^e siècle (Sanders, 2009 ; Becker & Park, 2011). L'intégration de la modélisation et de l'impression 3D dans l'enseignement de la géométrie s'inscrit dans cette ambition, en enrichissant l'expérience pédagogique par des applications concrètes et interdisciplinaires.

Inspirés par le constructionnisme (Papert & Harel, 1991), nous concevons les élèves comme des créateurs actifs de leur savoir, construisant du sens à travers l'expérimentation et la résolution de problèmes authentiques. Dans cette optique, nous prôtons un apprentissage contextualisé, relié à des situations réelles (Blumenfeld et al., 1991), où la créativité est mobilisée comme compétence essentielle pour innover et s'adapter (Robinson, 2011 ; Csikszentmihalyi, 1996).

La modélisation 3D, en lien avec la compétence numérique définie par le Gouvernement du Québec (2019) et Karsenti et al. (2020), permet de développer les habiletés technologiques nécessaires à l'utilisation des logiciels et plateformes numériques dans des activités pédagogiques et de la vie courante. Notre projet s'inscrit pleinement dans cette vision, intégrant les domaines STIM pour favoriser une compréhension globale des concepts et développer la pensée critique (Mai Huy, 2021). De plus, notre projet s'aligne avec plusieurs dimensions de la compétence numérique, soulignant l'importance de son intégration dans l'éducation moderne (Gouvernement du Québec, 2019 ; Karsenti et al., 2020).

3. *Mathématiques au primaire*

Dans notre projet, nous misons sur des projets et ateliers pour engager les élèves dans la résolution de situations-problèmes complexes en mathématiques, suivant les travaux de Cochran et al. (2016). Ces situations permettent de contextualiser les apprentissages dans des environnements réels et motivants. L'introduction à l'informatique et au codage, via les logiciels de modélisation 3D, joue un rôle central en mobilisant les notions mathématiques au service de la création numérique, dans des contextes innovants et ludiques.

Un axe fondamental de notre démarche est le développement de la pensée spatiale, notamment la compréhension des représentations dans un système tridimensionnel (X, Y, Z), essentielle pour la visualisation et la manipulation mentale des objets (Marchand & Bisson, 2017). Notre étude aborde également des notions clés telles que l'aire, la capacité et le volume, pour renforcer les relations quantitatives et le raisonnement proportionnel (Mai Huy, Theis et Mary, 2013 ; MÉQ, 2001 ; National Council of Teachers of Mathematics, 2000 ; Van de Walle & Lovin, 2008), au cœur de notre approche didactique visant une compréhension approfondie des mathématiques au primaire.

4. *Défis répertoriés par la recherche et question de recherche*

L'un des principaux défis de l'intégration de l'I3D réside dans la formation des enseignants, qui doivent non seulement maîtriser les outils de modélisation, mais aussi les intégrer de manière cohérente aux objectifs didactiques (Karsenti et al., 2020). La gestion du temps et des ressources techniques constitue également un enjeu important (Ndiaye et al., 2016 ; Heitz Ferrand & Gillot, 2018). Plusieurs études (Beauset et al., 2024 ; Heitz Ferrand & Gillot, 2018) insistent sur la nécessité de concevoir des activités spécifiquement orientées vers l'apprentissage de la géométrie, afin que l'I3D ne se limite pas à la reproduction d'objets, mais favorise la conceptualisation et le raisonnement mathématique.

L'accessibilité technologique et le coût du matériel demeurent par ailleurs des obstacles majeurs. L'acquisition d'imprimantes 3D représente un investissement significatif pour les écoles, et la réussite de l'implantation dépend de modèles économiques viables et d'un soutien logistique adapté (Schelly, Anzalone, Wijnen & Pearce, 2015).

Face à ces défis, nous préconisons une approche intégrative de l'I3D comme outil d'apprentissage interactif et collaboratif (Abu Khurma et al., 2023), ainsi qu'une démarche de co-construction dynamique des savoirs entre chercheurs, technopédagogues et enseignants, en adéquation avec les réalités du terrain (Desgagné et al., 2001 ; Paavola & Hakkarainen, 2005).

Ainsi, notre question de recherche se formule comme suit : « *Comment la modélisation et de l'impression 3D peuvent appuyer les élèves du primaire dans leur compréhension et leur apprentissage de la géométrie (et de la mesure) ?* »

II. CADRE DE RÉFÉRENCE

En abordant l'intégration de l'I3D dans le contexte éducatif primaire, il est essentiel de comprendre à la fois les avantages pédagogiques et les défis pratiques que cette technologie présente. Ce cadre de référence vise à présenter les concepts-clés de modélisation mathématique et de modélisation 3D, et nos objectifs de recherche, en nous appuyant sur des recherches actuelles et des pratiques collaboratives en didactique.

1. Modélisation mathématique et modélisation 3D

La modélisation, au cœur de l'activité mathématique, constitue un processus intellectuel complexe mobilisé pour représenter, interpréter et résoudre des situations concrètes à l'aide d'outils mathématiques. Dans la perspective de Yvain-Prébiski et Discours (2023), la modélisation mathématique permet non seulement de donner du sens aux objets mathématiques, mais aussi d'articuler des savoirs issus de différents domaines, ce qui renforce l'interdisciplinarité. Dans le contexte scolaire, elle engage les élèves dans une démarche itérative de problématisation, de représentation, de traitement et de validation, leur permettant ainsi de construire activement des connaissances. Cette vision rejoint notre approche pédagogique et didactique avec l'intégration de la modélisation 3D, notamment via l'utilisation de TinkerCad, qui rend concrètes les représentations mathématiques. Par la manipulation de formes tridimensionnelles, les élèves traduisent des contraintes géométriques en objets modélisés, favorisant ainsi la compréhension des grandeurs, des proportions et des transformations dans l'espace. L'environnement de conception numérique devient un outil médiateur qui prolonge la pensée mathématique dans l'action, tel que le suggèrent les auteurs, en soutenant la construction d'une pensée structurée et critique. Cette modélisation numérique, inscrite dans une dynamique d'exploration-rétroaction, favorise une entrée tangible dans des apprentissages géométriques souvent perçus comme abstraits par les élèves du primaire.

2. Approche collaborative et impact de l'impression 3D sur l'apprentissage des mathématiques

La collaboration entre chercheurs, technopédagogues et enseignants est un pilier central pour une intégration réussie des technologies en éducation, notamment l'impression 3D. Ce partenariat tripartite favorise un dialogue constant et le partage de connaissances, nécessaires à la co-construction d'objets de recherche pertinents et adaptés aux réalités du terrain (Altet, 2019 ; Desgagné et al., 2001). La recherche-action collaborative, comme l'indique Somekh (2006), offre une réponse plus ajustée aux besoins spécifiques des enseignants et des élèves, en facilitant l'intégration de nouvelles pratiques pédagogiques. L'approche collaborative et dialogique de Paavola et Hakkarainen (2005), quant à elle, va au-delà du simple échange d'informations, en permettant la création de connaissances partagées et évolutives.

3. Objectifs du projet

Dans le prolongement de l'approche collaborative et de l'impact de l'impression 3D sur l'apprentissage des mathématiques, notre projet vise à répondre aux défis identifiés en articulant des objectifs concrets. Nos trois objectifs s'alignent sur les enjeux pédagogiques, didactiques et technologiques, tout en favorisant une intégration harmonieuse de l'I3D dans les pratiques éducatives.

1. Intégrer efficacement l'impression 3D dans le curriculum de mathématiques au primaire : Développer des stratégies pour aligner l'utilisation des I3D avec les programmes d'études existants, en mettant l'accent sur l'enrichissement des concepts mathématiques fondamentaux.
2. Améliorer la compréhension spatiale et la résolution de problèmes en géométrie chez les élèves du primaire : Utiliser l'impression 3D pour développer la pensée spatiale des élèves et leur capacité à résoudre des problèmes géométriques complexes.
3. Favoriser une collaboration efficace entre chercheurs, technopédagogues et enseignants du primaire : Établir un cadre de travail collaboratif et dialogique pour une co-construction de connaissances et un développement professionnel continu.

III. PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION EN CLASSE : CONCEPTION ET IMPRESSION D'UN PORTE-CLÉS

L'objectif principal de cette première expérimentation en classe était d'initier les élèves à la modélisation et à l'impression 3D tout en mobilisant des notions mathématiques essentielles, notamment la proportionnalité, la mesure et les formes géométriques (MELS, 2009). Cette activité s'aligne avec les objectifs du Programme de formation de l'école québécoise (PFÉQ) (Ministère de l'Éducation du Québec, 2001) en intégrant les apprentissages mathématiques dans des contextes réels, favorisant ainsi la mobilisation des connaissances et le développement de compétences en résolution de problèmes.

À travers la conception et la fabrication d'un porte-clés personnalisé (voir ANNEXE), les élèves, de deux classes de 5^e année primaire des Hautes-Laurentides au Québec¹, ont exploré les principes de base de la géométrie et des unités de mesure, tout en développant des compétences numériques et collaboratives. Cette activité s'inscrit dans une approche intégrative qui favorise un apprentissage actif par la manipulation et la résolution de problèmes authentiques.

1. *Déroulement de l'activité*

L'expérimentation a débuté par une **introduction à l'impression 3D par le technopédagogue**, où les élèves ont découvert le fonctionnement de cette technologie, les matériaux utilisés ainsi que son impact environnemental. L'enseignant a encouragé les élèves à poser des questions, ce qui a mené à une discussion sur la nature des filaments et leur durabilité. Un élève a demandé : « Si on fait une forme, par exemple, une gourde, pis on la remplit dedans, est-ce que ça va être polluant pour l'environnement si on la jette ? » Cette interrogation a permis d'aborder les propriétés biodégradables du PLA et d'introduire une réflexion sur l'utilisation responsable des ressources. Nous y voyons également une opportunité didactique, qui n'est certes pas exploitée cette fois-ci, pour entamer avec les élèves une discussion sur les formes géométriques d'une « gourde » ou bouteille d'eau réutilisable, que les élèves apportent régulièrement en classe et donc la forme géométrique leur est familière.

Ensuite, l'**exploration des formes géométriques** s'est faite à l'aide du tableau interactif. Les élèves ont identifié les formes de base nécessaires à la conception de leur porte-clés et ont discuté de leurs propriétés mathématiques, notamment la proportionnalité et les unités de mesure. L'enseignant a interrogé les élèves : « Une bobine de fil coûte 25 \$ par kg, pourquoi on l'a mis en kg vous pensez ? Est-ce que je pourrais mesurer la quantité autrement ? » Un élève a répondu spontanément : « Par gramme ! ». Cette discussion a facilité le lien entre les notions de mesure et les unités utilisées en impression 3D.

Lors de la phase de **modélisation sur Tinkercad**, les élèves ont été guidés pour concevoir leur propre porte-clés selon des consignes précises : un prisme rectangulaire dont la largeur devait être trois fois plus grande que la longueur, un trou cylindrique pour attacher l'anneau et une personnalisation avec leur prénom en relief. L'enseignant a posé une question clé : « Vous voyez à droite, il y a différentes formes. Qu'est-ce qu'on va pouvoir prendre pour faire un prisme à base rectangulaire ? » Un élève a identifié correctement la forme et a ajouté : « Si on l'étire, ça devient un prisme ! ». L'activité a ainsi permis de provoquer une réflexion chez certains élèves sur les propriétés des solides et leurs dimensions.

¹ Cette activité de découverte agit comme la première d'une série de trois activités évolutives, co-développées avec le technopédagogue et les enseignants et qui seront expérimentées en classes d'ici la fin de l'année scolaire 24-25.

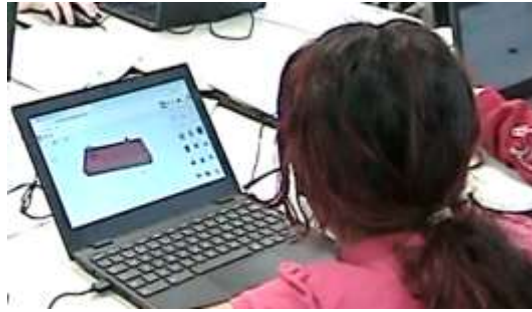


Figure 1 – Modélisation réussie d'un porte-clés par une élève grâce à Tinkercad

Avant d'imprimer, les élèves ont été invités à **estimer le poids et le coût de fabrication** de leur porte-clés en fonction du prix du filament. Cette étape a renforcé l'apprentissage des concepts de proportionnalité et de calcul des quantités. Enfin, l'impression des modèles a suscité un grand enthousiasme. Un élève a commenté avec émerveillement : « C'est vraiment cool ! Je ne pensais pas qu'on pouvait faire des objets nous-mêmes avec juste un ordinateur. »

2. Apprentissages et retombées pédagogiques

L'expérimentation a permis de mettre en lumière plusieurs retombées pédagogiques positives. Tout d'abord, le développement de la pensée spatiale a été renforcé grâce à la manipulation d'objets virtuels et à la transposition en objets physiques imprimés en 3D. Les élèves ont appris à ajuster les dimensions de leurs modèles et à comprendre comment ces changements affectaient la conception globale.

Ensuite, le renforcement des compétences mathématiques a été observable. L'application concrète des notions de mesure et de proportionnalité a facilité leur développement chez les élèves. Par exemple, un élève a démontré sa compréhension en calculant la longueur correcte d'un prisme : « Bein, ça marche. 20 [mm] fois 3, ça fait 60 [mm]. » Ce raisonnement a été valorisé et a permis une validation immédiate des apprentissages. Aussi, l'autonomie et la collaboration ont également été renforcées. Certains élèves, plus à l'aise avec le logiciel Tinkercad, ont spontanément aidé leurs camarades, facilitant ainsi un apprentissage entre pairs. Un enseignant a observé : « Ce qui est intéressant, c'est de voir comment ils s'entraident et comment ils expliquent leurs idées à leurs amis. Certains élèves qui sont d'habitude plus discrets prennent ici un rôle de leader. »

Enfin, l'intérêt et la motivation des élèves ont été accrus. La concrétisation d'une idée en un objet tangible a suscité un fort engagement. L'observation de l'impression a renforcé leur compréhension des processus techniques et a nourri leur curiosité. Un élève a exprimé sa satisfaction en voyant son porte-clés terminé : « C'est super l'un ! Bein, il y a des personnes qui n'ont jamais joué avec des imprimantes 3D pis c'est l'un de faire sa création. »

3. Défis rencontrés et ajustements pour les futures expérimentations

Malgré ces retombées positives, plusieurs défis ont été identifiés. D'abord, le temps d'apprentissage du logiciel s'est avéré plus long que prévu pour certains élèves, nécessitant un accompagnement renforcé. Pour pallier cela, il serait pertinent d'intégrer une phase d'entraînement préalable sur Tinkercad (Schelly et al., 2015). Ensuite, la précision des modèles a constitué un autre défi. Certains élèves ont rencontré des difficultés à bien positionner leur prénom sur leur porte-clés, ce qui a mené à des erreurs d'impression. Une attention particulière devra être accordée à la validation des modèles avant l'exportation des fichiers.

Enfin, la gestion du temps d'impression s'est avérée complexe. La durée de fabrication de chaque objet a parfois excédé le temps alloué, obligeant à imprimer certains modèles en dehors des heures de classe. Une solution envisageable serait de limiter la taille des porte-clés ou d'optimiser les réglages d'impression pour accélérer le processus.

Ces constats guideront les ajustements futurs, notamment l'intégration de tutoriels préalables sur l'utilisation du logiciel et l'optimisation des fichiers avant impression. Cette première expérimentation confirme que l'intégration de l'impression 3D en classe constitue un levier pédagogique et didactique pertinent, stimulant l'apprentissage des mathématiques tout en développant des compétences numériques et collaboratives.

IV. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES ET PERSPECTIVES

Les résultats préliminaires de cette première expérimentation révèlent un engagement marqué des élèves et une appropriation progressive des concepts mathématiques liés à la modélisation 3D. L'utilisation de l'impression 3D a favorisé un apprentissage actif et expérientiel, en accord avec les recommandations du Ministère de l'Éducation nationale (France) qui encourage l'usage des outils numériques pour le développement des compétences scientifiques et technologiques des élèves. Sur le plan mathématique, les élèves ont démontré une meilleure compréhension des notions spatiales et géométriques, notamment la proportionnalité et la mesure des objets. Comme l'indiquent Nicod et Parisod (2018), la manipulation de modèles 3D permet aux élèves de visualiser des relations complexes et d'expérimenter directement des transformations géométriques (Marchand & Bisson, 2017). Cette approche contribue également au renforcement de la pensée spatiale, une compétence essentielle en mathématiques (Assude et al., 2022 ; Marchand & Bisson, 2017).

L'expérimentation a également révélé l'impact positif du travail collaboratif dans l'apprentissage de la modélisation 3D. Les élèves se sont spontanémententraîdés, échangeant des stratégies pour surmonter les difficultés liées à la manipulation du logiciel. Comme l'a souligné l'enseignant 2 : « Certains élèves plus à l'aise ont spontanément aidé leurs camarades, ce qui a renforcé une dynamique de coopération et d'apprentissage entre pairs. » (Retour sur la première activité, 2025). Cette approche collaborative s'inscrit dans la logique des FabLabs, où l'apprentissage repose sur le partage des savoirs et la coopération (Nicod & Parisod, 2018). Par ailleurs, les élèves ont été encouragés à résoudre les problèmes par essais et erreurs, renforçant leur autonomie et leur capacité à raisonner de manière critique, une approche soutenue par Heintz Ferrand (2017).

Toutefois, plusieurs défis ont émergé, notamment le temps d'apprentissage du logiciel et la gestion du temps d'impression. Certains élèves ont éprouvé des difficultés à manipuler les outils numériques, nécessitant un accompagnement plus structuré. L'enseignant 2 rapporte : « Il faudrait prévoir une introduction plus progressive aux logiciels de modélisation pour éviter que les élèves ne se sentent dépassés. » (Retour sur la première activité, 2025). Bien que la motivation des élèves ait été significative, l'alignement des activités avec les objectifs du programme scolaire demeure un enjeu crucial. Assude et al. (2022) soulignent l'importance de relier les activités de manipulation de solides (imprimés ou confectionnés) aux concepts mathématiques fondamentaux, comme le volume ou la capacité, afin d'assurer un véritable apprentissage disciplinaire.

En donnant un sens concret aux apprentissages, l'I3D a suscité un vif intérêt et une curiosité accrue pour les notions mathématiques abordées, telles que les formes géométriques et les mesures modulables. Cette matérialisation a renforcé la motivation et l'autonomie des élèves en leur offrant une représentation tangible des concepts géométriques. Ng et al. (2022) montrent que l'introduction

d'outils numériques interactifs améliore significativement l'engagement et la compréhension des élèves grâce au caractère visuel et concret des concepts abordés.

Sur le plan didactique, la manipulation d'objets 3D a permis d'aborder en classe des notions abstraites telles que le volume, la proportionnalité, la mesure, la symétrie et les différentes formes géométriques (cylindre, cube, polyèdres). Cochran et al. (2016) soulignent l'importance de l'expérimentation concrète pour consolider les apprentissages mathématiques, une observation corroborée par les élèves qui ont affirmé mieux comprendre les formes et mesures en manipulant directement leurs créations.

Les résultats encouragent l'élargissement des expérimentations vers des projets interdisciplinaires associant mathématiques, sciences et technologies. Comme le souligne l'enseignant 1 lors de notre rencontre bilan : « Pour la prochaine activité, nous aimerions intégrer des calculs plus précis et des contraintes géométriques complexes pour aller plus loin dans l'apprentissage. » Une approche plus structurée de l'intégration de l'impression 3D sera ainsi développée, s'inspirant des recommandations du Ministère de l'Éducation nationale (n.d.) sur l'usage des outils numériques en classe. De plus, un renforcement de la formation des enseignants et un accompagnement technopédagogique sont envisagés pour optimiser l'impact de cette technologie sur les apprentissages (Heintz Ferrand, 2017).

V. CONCLUSION

Cette étude souligne le potentiel de l'impression 3D comme outil pédagogique innovant pour l'apprentissage de la géométrie au primaire. En favorisant une approche active, la modélisation et l'impression 3D ont renforcé l'engagement des élèves, stimulé leur pensée spatiale et facilité la compréhension des concepts abstraits, notamment la transition entre 2D et 3D (Nicod & Parisod, 2018). La collaboration entre pairs et l'apprentissage par essais-erreurs ont également développé leur autonomie dans l'appropriation des notions (Assude et al., 2022).

L'originalité de cette recherche repose sur l'usage de l'I3D comme levier structurant d'apprentissage mathématique, articulant concrètement concepts tels que volume (Assude et al., 2022), proportion, et transformations spatiales (Marchand & Bisson, 2017), conformément aux recommandations pour l'intégration des technologies éducatives (Ministère de l'Éducation nationale, 2018 ; Heitz Ferrand, 2017 ; Heitz Ferrand & Gillot, 2018). Cependant, plusieurs défis demeurent. La formation des enseignants est cruciale pour assurer une intégration pertinente de l'I3D aux séquences didactiques (Bower, 2017 ; Bower et al., 2020 ; Ndiaye et al., 2016). De plus, l'accessibilité technologique et la disponibilité des ressources restent des enjeux majeurs pour garantir une mise en œuvre équitable (Beauset et al., 2024).

À partir de ces constats, plusieurs recommandations s'imposent : adopter une approche progressive à la modélisation 3D avec des exercices guidés, articuler étroitement les activités au curriculum pour soutenir l'apprentissage des mathématiques, et promouvoir l'intégration de l'I3D dans des démarches interdisciplinaires STIM (Nicod & Parisod, 2018 ; Sanders, 2009). Enfin, une réflexion sur les modèles d'accompagnement technopédagogique, reposant sur la collaboration entre chercheurs, enseignants et formateurs, est essentielle pour assurer un usage durable et optimal de l'I3D (Heitz Ferrand & Gillot, 2018).

En définitive, cette recherche ouvre des perspectives prometteuses pour l'intégration de l'impression 3D comme levier d'innovation didactique en mathématiques. Son exploitation réfléchie contribuera à enrichir les pratiques pédagogiques, tout en renforçant les compétences spatiales, numériques et critiques des élèves.

RÉFÉRENCES

- Abu Khurma, O., Ali, N. et Swe Khine, M. (2023). Exploring the impact of 3D printing integration on STEM attitudes in elementary schools. *Contemporary Educational Technology*, 15(4), article ep458.
- Altet, M. (2019). Conjuguer des recherches sur les pratiques enseignantes et sur la formation des enseignants : une double fonction scientifique et sociale des Sciences de l'éducation. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 52(2), 29-60.
- Assude, T., Marchand, P., Millon-Fauré, K., Theis, L. et Koudogbo, J. (2022). Des systèmes d'aide à l'enseignement : une étude de cas à propos du volume. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 42(3), 285-324.
- Beauset, R., Lequeu, C. et Duroisin, N. (2024) Évaluation du processus cognitif de visualisation utilisé dans l'apprentissage de la géométrie. *Mesure et évaluation en éducation*, 47(1), 155-189.
- Becker, K. et Park, K. (2011). Effects of integrative approaches among science, technology, engineering, and mathematics (STEM) subjects on students' learning: A preliminary meta-analysis. *Journal of STEM Education*, 12(5-6), 23-37.
- Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M. et Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning. *Educational Psychologist*, 26(3-4), 369-398.
- Bower, M. (2017). *Design of technology-enhanced learning - Integrating research and practice*. Emerald Publishing Group.
- Bower, M., Stevenson, M., Forbes, A., Falloon, G. et Hatzigianni, M. (2020). Makerspaces pedagogy – supports and constraints during 3D design and 3D printing activities in primary schools. *Educational Media International*, 57(1), 1–28.
- Cochran, J., Cochran, Z., Laney, K. et Dean, M. (2016). Expanding geometry understanding with 3D printing. *Mathematics Teaching in the Middle School*, 21(9), 534-542.
- Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the psychology of discovery and invention*. HarperCollins.
- Desgagné, S., Bednarz, N., Lebuis, P., Poirier, L. et Couture, C. (2001). L'approche collaborative de recherche en éducation : un rapport nouveau à établir entre recherche et formation. *Revue des sciences de l'éducation*, 27(1), 33-64.
- Karsenti, T., Poellhuber, B., Parent, S. et Michelot, F. (2020). Qu'est-ce que le Cadre de référence de la compétence numérique ? *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 17(1), 7-10.
- Heitz Ferrand, M.-H. (2017). L'imprimante 3D pour la scolarisation des élèves en situation de handicap : des expérimentations en classe. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 79-80(3), 301-316. <https://doi.org/10.3917/nras.079.0301>
- Heitz Ferrand, M.-H. et Gillot, I. (2018). De l'impression 3D à la représentation dans l'espace : une expérience avec des élèves refusant d'apprendre. *La Nouvelle Revue - Éducation et Société Inclusives*, 83-84(3), 199-214.
- Marchand, P. et Bisson, C. (2017). *La pensée spatiale, géométrique et métrique à l'école : réflexions didactiques*. JFD.
- Ministère de l'Éducation du Québec [MÉQ]. (2001). *Programme de formation de l'école québécoise : domaine de la mathématique, de la science et de la technologie*. Gouvernement du Québec.

- Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur [MEES]. (2019). *Cadre de référence de la compétence numérique*. Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation nationale, France (n.d.). *L'impression 3D à l'école*. Dossier pédagogique.
- National Council of Teachers of Mathematics (NCTM). (2000). *Principles and standards for school mathematics*. NCTM.
- Ndiaye, Y., Hérold, J. F. et Laisney, P. (2016). L'imprimante 3D, outil d'aide à l'apprentissage des élèves dans l'activité de conception créative au lycée technologique. Dans *Actes du Colloque international francophone « Éduquer et former au monde de demain », avril 2016*. <https://amu.hal.science/hal-01443653>
- Nicod, R. et Parisod, L. (2018). Trois outils de fabrication différents pour rendre plus accessible l'enseignement de la géométrie à l'école primaire. *Revue de Mathématiques pour l'école*, 230, 38-45. <https://doi.org/10.26034/vd.rm.2018.1780>
- Ng, D. T. K., Tsui, M. F. et Yuen, M. (2022). Exploring the use of 3D printing in mathematics education: A scoping review. *Asian Journal for Mathematics Education*, 1(3), 338-358.
- Paavola, S. et Hakkarainen, K. (2005) The knowledge creation metaphor – An emergent epistemological approach to learning. *Science et Education*, 14(6), 535-557.
- Papert, S. et Harel, I. (1991) *Constructionism*. Ablex Publishing.
- Robinson, K. (2011). *Out of our minds: Learning to be creative*. Capstone.
- Roy, N., Caron, V. & Plante, A. (2023) Le numérique au service des pratiques créatives au primaire. *Vivre le primaire (Automne 2023)*, 58-61.
- Sanders, M. (2009) STEM, STEM Education, STEMmania. *The Technology Teacher*, 68(4), 20-26.
- Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B. et Pearce, J. M. (2015). Open-source 3D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. *Journal of Visual Languages et Computing*, 28, 226-237. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3331158>
- Somekh, B. (2006). *Action research: A methodology for change and development*. Open University Press.
- Yvain-Prébiski, S. et Discours, J. (2023). La modélisation mathématique dans la résolution de problèmes concrets (Atelier A13 et 23). Dans *Actes du 48^e colloque international sur la formation en mathématiques des professeurs des écoles (COPIRELEME2022), 14-16 juin 2022, Toulouse, France* (p. 129-148). <https://hal.science/hal-04206854/document>

ANNEXE

1^{ère} Activité impression 3D



Votre classe aimerait organiser une sortie spéciale pour Noël. Pour financer cette activité, vous allez fabriquer et vendre des porte-clés personnalisés.

L'objectif est de récolter 1 000 \$ après avoir payé toutes les dépenses. Les porte-clés seront fabriqués avec une imprimante 3D, en utilisant du Polyterra, un matériau solide et écologique. Une bobine de fil Polyterra coûte 25 \$ par kilogramme. Dans un premier temps, vous allez réaliser un test pour vous entraîner à fabriquer un porte-clé. Voici les étapes à suivre :

1. **Nommer le fichier** : Enregistrez le fichier en mettant votre prénom comme nom de fichier (**en haut à gauche**)
2. **La base du porte-clé** : Elle sera un prisme rectangulaire. Sa largeur doit être 3 fois plus grande que sa longueur. Ajuster la hauteur à 5.
3. **Ajouter un trou** : Ajoutez un cylindre à gauche du prisme pour faire un trou.
4. **Ajoutez votre prénom** : Utilisez la fonction **TEXT** pour écrire votre prénom et placez-le sur le porte-clé. Ajuster la hauteur à 5.

Une fois votre conception terminée, exportez le fichier en format .STL. Pendant la préparation pour l'impression (le découpage), vérifiez combien de grammes de fil seront nécessaires pour fabriquer votre porte-clé.