

MODÉLISATION ET IMPRESSION 3D EN SOUTIEN À L'APPRENTISSAGE DE LA GÉOMÉTRIE : UNE EXPLORATION DE L'APPRENTISSAGE ACTIF AU PRIMAIRE

Khoi Mai Huy, professeur

Jean-François Ouellette, technopédagogue

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Résumé

Cette étude examine l'intégration de la modélisation et de l'impression 3D (I3D) dans l'enseignement de la géométrie au primaire, en mettant en lumière ses effets sur l'apprentissage actif et la compréhension des concepts abstraits. En favorisant une approche interactive, l'I3D permet aux élèves de manipuler concrètement des objets mathématiques, renforçant ainsi leur pensée spatiale et leur engagement. La première expérimentation menée révèle un impact positif sur la motivation et l'autonomie des élèves, ainsi que sur le développement de compétences numériques et collaboratives. Toutefois, son intégration pose des défis en matière de formation des enseignants et d'accessibilité technologique. Cette recherche explore les conditions d'une mise en œuvre optimisée de l'I3D dans le curriculum scolaire afin d'en maximiser les retombées pédagogiques.

Mots-clés : Modélisation 3D, Impression 3D, Enseignement de la géométrie, Compétences numériques, Géométrie au primaire

Abstract

This study examines the integration of 3D modeling and printing (I3D) in elementary geometry education, highlighting its effects on active learning and the understanding of abstract concepts. By promoting an interactive approach, I3D allows students to physically manipulate mathematical objects, thereby strengthening their spatial thinking and engagement. The conducted experiment reveals a positive impact on students' motivation and autonomy, as well as on the development of digital and collaborative skills. However, its integration poses challenges regarding teacher training and technological accessibility. This research explores the conditions for an optimal implementation of I3D in the school curriculum to maximize its pedagogical benefits.

Keywords: *3D Design, 3D Printing, Geometry Teaching, Digital Skills, Elementary Geometry*

Contextualisation et problématisation de la recherche

Dans un contexte éducatif en pleine transformation, l'essor des technologies comme l'impression 3D ouvre de nouvelles perspectives didactiques en mathématiques au primaire. Dans ce sens, notre étude propose une exploration de la modélisation et de l'impression 3D comme outils innovants pour soutenir l'apprentissage de la géométrie au primaire, répondant ainsi aux besoins d'une éducation qui se veut adaptée aux défis actuels.

Problématisation

L'intérêt grandissant pour la modélisation et l'impression 3D dans le domaine de l'éducation, notamment en géométrie, reflète la volonté d'adopter des approches plus interactives et ancrées dans l'exploration des concepts mathématiques et dans la manipulation concrète, comme le démontrent les travaux de Cochran et al. (2013, 2016), MEES (2021), Ng, Tsui et Yuen (2022) et Roy et al. (2023).

La pertinence de ce domaine se fonde d'une part sur l'accessibilité de plus en plus facile et variée des technologies d'I3D et d'autre part sur la diversité croissante des imprimantes 3D disponibles, qui ouvrent de nouvelles perspectives didactiques et pédagogiques. En particulier, ces outils innovateurs permettent d'offrir une expérience d'enseignement et d'apprentissage concrète et tactile, répondant à un besoin essentiel dans l'enseignement de concepts abstraits au primaire, tels que le volume, la surface et la mesure.

Les études menées par Cochran et al. (2016) au niveau du secondaire, ainsi que Roy et al. (2023) au Québec au niveau du primaire, soulignent les bénéfices tangibles des technologies I3D dans l'apprentissage des mathématiques au primaire, plus spécifiquement en géométrie. Elles démontrent comment ces technologies jouent un rôle

de facilitateur de la manipulation physique des formes géométriques, rendant les concepts a priori abstraits plus accessibles et compréhensibles pour les élèves. Ce faisant, ces technologies favorisent un apprentissage ancré dans la réalité.

Cependant, l'intégration de l'I3D dans le contexte spécifique de l'enseignement de la géométrie au primaire pose des questions fondamentales quant à son potentiel véritable : comment ces outils technologiques peuvent-ils non seulement enrichir la compréhension géométrique, mais aussi améliorer durablement l'apprentissage de la géométrie et de la mesure chez les élèves ?

Cette question soulève des enjeux à la fois pédagogiques, didactiques et méthodologiques, qui se trouvent au cœur de notre démarche de recherche. Ainsi, nous visons à explorer les conditions et les modalités d'une intégration efficace des technologies d'I3D dans le curriculum scolaire, afin de favoriser une meilleure appropriation des concepts géométriques par les élèves du primaire. Ce questionnement guide l'ensemble de notre projet et constitue un axe central de notre étude.

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 essentiel pour une éducation intégrative et en phase avec les exigences du 21^e siècle (Sanders, 2009; Becker et Park, 2011). Cette approche vise à favoriser une compréhension transversale des disciplines scientifiques, tout en préparant les élèves à relever les défis complexes et interdisciplinaires de demain. En ce sens, l'intégration de la modélisation et de l'impression 3D dans l'enseignement de la géométrie répond à cette ambition en enrichissant l'expérience pédagogique par des applications concrètes et innovantes.

Inspirés par les travaux de Papert et Harel (1991) sur le constructionnisme, nous concevons les élèves comme des créateurs actifs de leur savoir, capables de construire du sens à travers l'expérimentation et la résolution de problèmes authentiques. Dans cette perspective, nous prôtons un apprentissage contextualisé basé sur des problèmes réels,

qui permet aux élèves de relier les concepts mathématiques à leur environnement quotidien, comme le suggèrent Blumenfeld et al. (1991). La créativité occupe également une place centrale dans notre démarche, en tant que compétence clé pour innover et s'adapter, suivant les réflexions de Robinson (2011) et Csikszentmihalyi (1996), qui soulignent son importance dans l'apprentissage des élèves et leur développement global.

Par ailleurs, la modélisation 3D est reconnue comme un outil pédagogique interdisciplinaire pour développer et mobiliser chez nos élèves leurs habiletés technologiques. 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, p. 14 ; Karsenti et al., 2020). Notre projet fait écho à cette vision, intégrant les domaines STIM pour une compréhension globale des concepts.

Mathématiques au primaire

Dans notre projet, nous plaçons l'accent sur l'utilisation de projets et d'ateliers pour engager les élèves dans la résolution de situations-problèmes complexes en mathématiques, une approche appuyée par les travaux de Cochran et al. (2016) et de Roy et al. (2023). Ces situations-problèmes permettent de contextualiser les apprentissages mathématiques dans des environnements réels et motivants. En particulier, l'introduction à l'informatique et au codage à travers l'utilisation de logiciels de modélisation 3D joue un rôle central dans la mobilisation des notions mathématiques au service de la création numérique, offrant aux élèves des contextes innovants et ludiques pour développer leurs compétences.

L'un des axes fondamentaux de notre étude réside dans le développement de la pensée spatiale, en particulier la compréhension des représentations dans un système de trois axes (X, Y, Z). Cette exploration est essentielle pour améliorer la capacité des élèves à visualiser et manipuler mentalement des objets dans l'espace, un aspect clé pour la maîtrise de concepts géométriques (Marchand et Bisson, 2019). Nous abordons également des notions cruciales telles que l'aire, la capacité et le volume, afin de renforcer la compréhension des relations quantitatives et du raisonnement proportionnel (Mai Huy,

Theis et Mary, 2013; MÉQ, 2001; National Council of Teachers of Mathematics, 2000; Van de Walle et Lovin, 2008). Ces concepts sont au cœur de notre démarche didactique, visant à favoriser une compréhension plus profonde des mathématiques au primaire.

Défis répertoriés par la recherche et question de recherche

Notre projet explore également les défis inhérents à l'intégration des technologies d'impression 3D (I3D) en éducation. Kit Ng et al. (2022) mettent en avant l'importance cruciale de définir des objectifs pédagogiques et didactiques précis et mesurables pour que l'I3D soit pleinement exploitée dans un cadre d'apprentissage efficace. L'un des risques relevés est que ces technologies soient utilisées comme de simples outils de démonstration, centrés sur l'enseignant, une critique soulevée par Bower (2017) et par Bower, Stevenson, Forbes, Falloon et Hatzigianni (2020), ce qui limite l'engagement actif des élèves et leur appropriation des concepts.

Un défi central réside dans la formation des enseignants, qui doivent non seulement maîtriser les outils de modélisation 3D, mais aussi les intégrer de manière cohérente aux objectifs pédagogiques et didactiques. Plusieurs recherches, dont celles de Karsenti et al. (2020), insistent sur le fait que l'adoption de l'I3D en milieu scolaire repose sur la formation des enseignants, qui doivent non seulement maîtriser ces outils, mais aussi les intégrer efficacement dans leur enseignement. Un accompagnement technopédagogique structuré est essentiel pour maximiser l'impact didactique de cette technologie. La modélisation et l'impression 3D exigent une maîtrise des logiciels de conception, ce qui peut poser un enjeu en raison du temps nécessaire pour s'y former et du manque de ressources pédagogiques adaptées. Sans un accompagnement adéquat, il existe un risque que l'I3D soit sous-utilisée ou employée de manière superficielle, limitant son potentiel éducatif.

En réponse à ces défis, nous soulignons la nécessité d'adopter une approche véritablement intégrative, comme le recommandent Abu Khurma et al. (2023), où l'I3D est conçue comme un outil d'apprentissage interactif et collaboratif. L'intégration efficace de l'I3D doit être pensée en lien avec les besoins réels du curriculum et alignée sur des

stratégies pédagogiques éprouvées, permettant une appropriation active des concepts mathématiques par les élèves.

De plus, nous favorisons une démarche collaborative entre chercheurs, technopédagogues et enseignants, tel que l'ont préconisé Desgagné, Bednarz, Lebuis, Poirier et Couture (2001) ainsi que Paavola et Hakkarainen (2005), permettant une co-construction dynamique des savoirs, en adéquation avec les réalités du terrain éducatif. Une telle approche permet non seulement de mieux arrimer les objectifs pédagogiques aux usages technologiques, mais également de co-développer des stratégies didactiques pertinentes et adaptées aux contraintes du milieu scolaire.

Enfin, un autre défi soulevé est celui de l'accessibilité et de l'infrastructure technologique. L'acquisition d'imprimantes 3D et de matériaux de fabrication représente un coût important pour les écoles. De plus, la maintenance des équipements et la gestion des impressions en classe nécessitent une organisation rigoureuse et un encadrement approprié. Comme l'indiquent Schelly, Anzalone, Wijnen et Pearce (2015), la réussite de l'implantation de l'I3D repose sur la mise en place de modèles économiques viables et d'un soutien logistique adapté aux besoins des établissements scolaires.

Première expérimentation en classe : Conception et impression de porte-clés

L'activité proposée visait à initier les élèves à la modélisation 3D en combinant approche ludique et apprentissage des concepts mathématiques. Plus précisément, elle avait pour objectif d'introduire des notions fondamentales de géométrie et de proportionnalité en exploitant les potentialités de la modélisation et de l'impression 3D. Cette approche immersive permet aux élèves de mieux comprendre les concepts mathématiques abstraits grâce à la manipulation d'objets physiques et à l'expérimentation directe.

1. Analyse a priori de l'expérimentation : encrage dans la Progression des Apprentissages (PdA) et le Programme de Formation de l'École Québécoise

L'activité de conception et impression 3D de porte-clés constitue une approche didactique innovante favorisant l'apprentissage actif des mathématiques au primaire. Elle mobilise des concepts clés en géométrie, comme la manipulation des solides et le repérage spatial, tout en renforçant la compréhension des transformations géométriques et des relations entre figures (MELS, 2009, p. 14-15). En parallèle, elle engage les élèves dans une démarche de mesure authentique, impliquant l'estimation des dimensions, le calcul de la masse du filament et la gestion des coûts d'impression (MELS, 2009, p.17). Cette activité s'inscrit dans les objectifs du Programme de formation de l'école québécoise (PFÉQ) (Ministère de l'éducation du Québec, 2001) en reliant les savoirs mathématiques à des situations concrètes, stimulant ainsi la réflexion et la résolution de problèmes complexes.

Par ailleurs, la modélisation 3D exige une prise de décision structurée sur divers paramètres, favorisant le développement de compétences en planification et en analyse critique. Elle offre également une expérience d'apprentissage tangible et motivante, renforçant l'engagement des élèves et leur persévérance en mathématiques (Karsenti et al., 2020). Notamment, l'aspect de l'impression 3D nécessite une estimation et une conversion des unités de mesure, notamment la masse du filament utilisé pour l'impression des porte-clés. Cette activité engage les élèves dans une démarche de mesure authentique où ils doivent estimer et mesurer des dimensions en unités conventionnelles (millimètres, grammes).

2. Introduction à l'impression 3D et discussion sur la technologie

L'activité a débuté par une présentation interactive du fonctionnement des imprimantes 3D et des différentes étapes du processus de fabrication additive. Les élèves ont pu observer la machine en action, poser des questions et manipuler des objets déjà imprimés afin de mieux comprendre les propriétés des matériaux et les capacités de cette

technologie. L'un des aspects qui a particulièrement suscité leur curiosité concernait l'impact environnemental du filament PLA utilisé pour l'impression.

Une élève a soulevé la question suivante : *"Si on fait une forme, par exemple, une gourde, puis on la remplit dedans, est-ce que ça va être polluant pour l'environnement, si on la jette ?"* (Fille, chandail noir centre). Cette interrogation a mené à une discussion sur les propriétés biodégradables du PLA et sur la nécessité d'adopter une consommation responsable des ressources. Cet échange a permis de sensibiliser les élèves aux questions environnementales tout en contextualisant l'usage de l'impression 3D dans une perspective de développement durable.

3. Modélisation sur TinkerCAD et approche mathématique

Après cette introduction, les élèves ont été invités à concevoir un porte-clé personnalisé à l'aide du logiciel TinkerCAD. Cette phase de modélisation leur a permis d'explorer plusieurs notions mathématiques, notamment les formes géométriques au primaire, les dimensions, la proportionnalité.

Un échange en classe illustre bien cette intégration des concepts mathématiques : Enseignant : *"Donc, on a dit 25 dollars par Kg, comment on va faire pour trouver combien ça coûte un porte-clé ?"* (Fille, chandail turquoise) : *"On va diviser par le nombre de porte-clés qu'on va faire."*

Cette interaction a permis d'introduire une réflexion sur les coûts de production, reliant ainsi les mathématiques à une application concrète. Les élèves ont ainsi développé une meilleure compréhension des rapports de proportionnalité et du concept de division appliqué à une situation réelle.

4. Défis rencontrés et résolution de problèmes

L'apprentissage par la manipulation et l'expérimentation directe a révélé des défis techniques qui ont enrichi le processus éducatif. Certains élèves ont éprouvé des difficultés

à ajuster la taille de leur modèle ou à bien positionner leur prénom sur la surface de leur porte-clé (ni trop bas ni trop haut par rapport à la surface du porte-clé). Ces erreurs ont été abordées comme des occasions d'apprentissage, favorisant une approche par essais et erreurs.

Un élève a exprimé son enthousiasme face à la découverte des outils numériques : *"C'est vraiment cool ! J'pensais pas qu'on pouvait faire des objets nous-mêmes avec juste un ordinateur."* (Garçon, chandail rouge). Cette réflexion illustre bien comment l'I3D peut éveiller un intérêt pour la création numérique et renforcer la motivation des élèves à apprendre en manipulant directement des outils technologiques.

5. Observation de l'impression et réaction des élèves

Une fois les modèles finalisés, les élèves ont pu observer l'impression de leurs créations en temps réel. Cette phase a généré beaucoup d'enthousiasme et de curiosité. Voir la transformation de leur conception numérique en un objet physique a renforcé leur sentiment d'accomplissement et leur engagement dans l'activité.

L'un des moments marquants fut l'excitation palpable lorsque la première impression fut terminée : *"C'est super l'fun ! Bin, il y a des personnes qui n'ont jamais joué avec des imprimantes 3D pis c'est l'fun de faire sa création."* (Fille, chandail noir centre). Cette réaction illustre bien l'impact positif de l'apprentissage actif sur la motivation et la satisfaction des élèves.

L'observation du processus d'impression a également été l'occasion d'introduire des discussions sur les paramètres de fabrication, notamment l'épaisseur des couches en millimètres et le temps d'impression (en heures et en minutes). Certains élèves ont été surpris par la durée nécessaire pour imprimer un petit objet et ont commencé à questionner les paramètres qui influencent cette durée.

6. Collaboration et apprentissage entre pairs

L'un des aspects les plus enrichissants de cette activité a été l'apprentissage collaboratif. Les élèves ont spontanément partagé leurs astuces et solutions pour optimiser leurs modèles, renforçant ainsi les dynamiques d'entraide et de co-construction des connaissances.

Un enseignant a remarqué : *"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 ou d'assistant auprès de certains de leurs camarades, parce qu'ils comprennent rapidement comment fonctionne le logiciel."* (Enseignant, observation en classe).

Cette mise en situation illustre bien comment l'I3D favorise le développement des compétences transversales, notamment la communication, la collaboration et la capacité à résoudre des problèmes en groupe.

7. Retour réflexif sur l'activité

En résumé, cette expérimentation a montré que l'intégration de la modélisation et de l'impression 3D en classe offre un potentiel pédagogique riche. L'activité a non seulement permis d'aborder des concepts mathématiques de manière concrète, mais elle a aussi favorisé le développement de compétences numériques et collaboratives essentielles dans le monde actuel.

Les verbatims recueillis montrent un fort enthousiasme des élèves, une motivation accrue pour les mathématiques et un intérêt renouvelé pour les technologies numériques. Ces premiers résultats suggèrent que l'utilisation de l'impression 3D en milieu scolaire pourrait être un levier efficace pour diversifier les approches pédagogiques et rendre l'apprentissage plus engageant et significatif.

Les prochaines étapes consisteront à approfondir l'analyse de l'impact de ces activités sur la compréhension des notions mathématiques à moyen et à long terme et à explorer comment l'I3D peut être intégrée de manière durable dans le curriculum scolaire.

L'activité proposée visait à initier les élèves à la modélisation 3D en combinant approche ludique et apprentissage des concepts mathématiques. En premier lieu, une discussion sur les principes de l'impression 3D a permis aux élèves d'explorer son fonctionnement et ses applications.

Cette expérimentation a révélé que l'intégration de l'I3D en classe ne se limite pas à un simple outil technologique, mais agit comme un catalyseur d'engagement et de motivation, et la modélisation 3D sert de contexte d'apprentissage pertinent. L'autonomie laissée aux élèves dans la conception de leur objet leur a permis d'explorer activement différentes stratégies et de coopérer avec leurs pairs, favorisant ainsi un apprentissage collaboratif et réflexif.

Résultats préliminaires et perspectives

L'analyse des résultats préliminaires met en évidence plusieurs tendances prometteuses quant à l'impact de l'I3D sur l'apprentissage des mathématiques au primaire. L'engagement des élèves a été marqué par une participation active et une implication soutenue tout au long de l'activité. L'expérience de l'I3D a suscité un fort engagement des élèves, qui ont apprécié la transformation de leur conception numérique en un objet tangible, confirmant ainsi les conclusions de Roy et al. (2023) selon lesquelles l'utilisation des technologies numériques favorise l'intérêt des élèves pour travailler les concepts mathématiques (dans notre cas la géométrie et la mesure).

En donnant un sens concret et un réel défi multiple aux apprentissages, l'I3D a suscité un fort intérêt et une curiosité accrue pour les notions mathématiques abordées, tel que des formes géométriques et des mesures vérifiables et modulables. Cette matérialisation a renforcé leur motivation et leur autonomie dans l'apprentissage, en leur offrant une représentation concrète des concepts géométriques abordés. Ng, Tsui et Yuen

(2022) ont démontré que l'introduction d'outils numériques interactifs dans l'enseignement des mathématiques améliore significativement l'engagement et la compréhension des élèves en raison du caractère visuel et concret des concepts abordés.

D'un point de vue didactique, la manipulation directe d'objets 3D a permis d'aborder en classe des notions abstraites comme les différentes formes géométriques (cylindre, cube, polyèdres, etc.), le volume, la proportionnalité, la mesure et la symétrie. Cochran et al. (2016) insistent sur l'importance de l'expérimentation concrète pour solidifier les apprentissages mathématiques, une observation confirmée par les retours d'élèves qui ont souligné qu'ils comprenaient mieux les formes et mesures en voyant et manipulant directement leurs créations.

Un autre élément marquant a été l'impact de l'activité sur les compétences numériques des élèves. Ceux-ci ont appris à naviguer dans un environnement numérique en développant des compétences essentielles en modélisation 3D et en compréhension des processus de fabrication additive. Ces nouvelles habiletés s'inscrivent dans les compétences du 21^e siècle, notamment en lien avec la pensée computationnelle et la résolution de problèmes. Karsenti et al. (2020) soulignent que l'intégration des technologies numériques en classe renforce les capacités d'adaptation et la créativité des élèves, des atouts majeurs pour leur future réussite académique et professionnelle. Par ailleurs, cette approche a eu un impact significatif sur le développement des compétences transversales. Les interactions entre pairs ont favorisé l'entraide et la coopération, renforçant une approche collaborative et active de l'apprentissage (Desgagné et al., 2001 ; Roy et al., 2023). Le travail en équipe a encouragé la discussion et la prise de décisions collectives, des compétences essentielles qui dépassent le cadre strictement mathématique. En collaborant pour résoudre des problèmes liés à la conception et à l'impression de leurs objets, les élèves ont démontré une capacité accrue à négocier des solutions et à s'adapter aux contraintes techniques du processus.

Un autre enjeu soulevé concerne les défis d'accessibilité et d'adoption de l'impression 3D en classe. Si cette technologie s'avère prometteuse, son intégration nécessite une formation adéquate des enseignants et des infrastructures adaptées.

Certains enseignants participants ont exprimé leurs préoccupations quant au temps nécessaire pour maîtriser les logiciels de modélisation et pour gérer l'impression des objets en classe. Comme le relèvent Bower et al. (2020), l'un des risques de l'implantation de nouvelles technologies en milieu scolaire est leur sous-utilisation en raison d'un manque de formation et de soutien technique.

Conclusion

Les résultats préliminaires de cette étude montrent que l'intégration de la modélisation et de l'impression 3D dans l'enseignement de la géométrie au primaire constitue un levier pédagogique et didactique prometteur. En mobilisant des approches interactives et immersives, cette technologie permet d'ancrer l'apprentissage des concepts mathématiques dans une expérience concrète et engageante. Les élèves du primaire observés développent ainsi une meilleure compréhension des formes et des relations spatiales, tout en renforçant leurs compétences numériques et collaboratives. L'enthousiasme et l'engagement observés lors des séances expérimentales démontrent que cette approche s'avère propice à stimuler leur intérêt pour les mathématiques et leur persévérance dans la résolution de problèmes complexes.

Par ailleurs, l'utilisation de la modélisation 3D favorise une approche multidimensionnelle de l'apprentissage. En plus de diversifier les stratégies pédagogiques et didactiques, la modélisation 3D stimule le développement de compétences essentielles du 21^e siècle, comme la pensée critique et la créativité, tout en offrant une approche expérientielle favorisant l'apprentissage actif (Karsenti et al., 2020; Papert et Harel, 1991). En effet, au-delà des apprentissages mathématiques, les élèves ont acquis une certaine autonomie dans l'utilisation d'outils technologiques et ont collaboré de manière efficace pour relever les défis liés à la modélisation et à l'impression de leurs objets.

Cependant, plusieurs défis subsistent quant à l'intégration durable de cette technologie en milieu scolaire. Comme le soulignent Bower et al. (2020), la formation des enseignants constitue un enjeu majeur : bien que les outils de modélisation 3D soient de plus en plus accessibles, leur appropriation nécessite un accompagnement adapté et un

soutien technique. De plus, l'infrastructure technologique et les ressources matérielles doivent être suffisantes pour assurer une mise en œuvre efficace et équitable de l'impression 3D en classe. Une réflexion approfondie sur les stratégies d'implantation et sur les modèles d'accompagnement pédagogique est donc essentielle pour garantir une intégration réussie à grande échelle.

En ce sens, les prochaines étapes de notre recherche viseront à approfondir l'analyse des impacts à moyen et long terme de l'I3D sur l'apprentissage des élèves et à explorer des pistes d'optimisation pour son intégration dans le curriculum. Il sera pertinent d'évaluer dans quelle mesure cette approche influence les performances scolaires en mathématiques et d'identifier les meilleures pratiques pour maximiser son efficacité pédagogique et didactique. En parallèle, une collaboration plus étroite avec les enseignants et les décideurs éducatifs permettra d'adapter les ressources et les formations aux besoins réels du terrain.

En conclusion, cette étude, qui vient seulement de débiter, met en lumière les bénéfices, mais aussi les défis liés à l'utilisation de l'impression 3D en éducation. Si cette technologie présente un fort potentiel pour rendre l'apprentissage des mathématiques plus interactif et stimulant, sa mise en œuvre nécessite une approche réfléchie et concertée entre les différents acteurs. En conjuguant innovation technologique et pédagogie active, et à travers d'un dialogue et une planification résolument collaboratifs entre chercheurs, technopédagogues et enseignants, il est possible de transformer durablement les pratiques d'enseignement et de mieux préparer les élèves aux défis actuels et futurs du monde numérique.

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), ep458.

- Becker, K., 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.
- Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. Harper Collins.
- 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 / International Journal of Technologies in Higher Education* 17(1), 7–10.
- Kit Ng, D. T., 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.
- Mai Huy, K., Theis, L. et Mary, C. (2013). L'influence du contexte statistique sur le raisonnement proportionnel d'élèves du primaire. *Nouveaux cahiers de la recherche en éducation*, 16(2), 112–146.
- 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*. Québec.

- Ministère de l'Éducation, des Loisirs et des Sports du Québec (MELS) (2009). *Progression des apprentissages - Mathématiques*. Québec.
- Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (2019). *Cadre de référence de la compétence numérique*. Gouvernement du Québec.
- National Council of Teachers of Mathematics (NCTM) (2000). *Principles and Standards for School Mathematics*.
- Paavola, S., Hakkarainen, K. (2005). The Knowledge Creation Metaphor – An Emergent Epistemological Approach to Learning. *Science et Education* 14(6), 535-557.
- Papert, S., Harel, I. (1991). *Constructionism*. Ablex Publishing.
- Robinson, K. (2011). *Out of Our Minds: Learning to be Creative*. Capstone.
- Roy, N., Caron, V. et 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.
- Van de Walle, J.A. et Lovin, L.H. (2008). L'enseignement des mathématiques : L'élève au centre de son apprentissage, Tome 2. ERPI.